

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

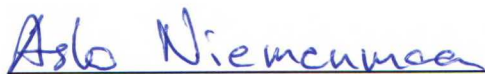
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Tuomas Laitinen

SUURITEHOISEN KESTOMAGNEETTI

RUORIPOTKURIMOOTTORIN SUUNNITTELU JA OPTIMOINTI

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 6.8.2001



Työn valvoja

Professori Asko Niemenmaa

Työn ohjaaja

DI Miikka Hakuli, ABB Industry Oy

Tekijä:	Tuomas Laitinen		
Työn nimi:	Suuritehoisen kestopagneetti ruoripotkurimoottorin suunnittelu ja optimointi		
Päivämäärä:	6.8.2001	Sivumäärä:	70
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikka		
Professuuri:	S-17 Sähkötekniikka (Sähkömekaniikka)		
Työn valvoja:	Professori Asko Niemenmaa		
Työn ohjaaja:	DI Miikka Hakuli		
<p>Tässä diplomityössä on esitetty suuritehoisen kestopagneetti ruoripotkurimoottorin sähkömagneettinen ja terminen mitoittaminen.</p> <p>Sähkömagneettisessa mitoituksessa optimoitavat suunnitteluparametrit käsittävät napaluvun, staattorin käämityksen sekä kestopagneettien sijoittelun, dimensiot ja materiaalit. Tahtimoottorin nimellinen toimintapiste, staattorin ulkohalkaisija ja levysydämen pituus on kiinnitetty mitoituksen lähtökohdiksi.</p> <p>Elementtimenetelmäohjelmistolla toteutettu vertailu pinta-, pysty- ja v-magnetoidulle 20 megawatin tahtimoottorille esitetään. Tyhjäkäynti, nimellinen toimintapiste sekä muutostiloista 2- ja 3-vaiheinen oikosulkutilanne tutkitaan huomion kohdistuessa muun muassa kestopagneettien demagnetoitumisen välttämiseen. Vertailussa jäähdytysratkaisun oletetaan perustuvan pakotettuun ilmankiertoon.</p> <p>Käytettäessä ilmankierron sijasta suoraa merivesijäähdytystä, perustuu yksikön jäähtyminen lämmönsiirtymiseen ympäröivään meriveteen. Ratkaisu on lämmönsiirtokyvyn osalta pakotettuun ilmankiertoon nähden huomattavasti heikompi. Lämpöverkon kehittäminen puristussovitetulle ruoripotkuriyksikölle esitetään ja raja-arvo sallituissa lämpenemissä pysyväälle tahtimoottorin yksikkökoolle etsitään.</p> <p>Lisäksi työssä esitetään lämmönsiirtymisteoria, tahtimoottorin rakenne ja ruoripotkurimoottorien ominaisuudet.</p>			
Avainsanat:	Potkurikäyttö, tahtikone, kestopagneetti, lämpöverkko		

Author:	Tuomas Laitinen		
Name of the Thesis:	Designing and Optimising of a Large Power Podded Propulsion Drive Excited with Permanent Magnets		
Date:	6.8.2001	Number of pages:	70
Department:	Electrical and Communications Engineering		
Professorship:	S-17 Electrical Engineering (Electromechanics)		
Supervisor:	Professor Asko Niemenmaa		
Instructor:	M.Sc. Miikka Hakuli		
<p>Electromagnetic and thermal dimensioning of a large power podded propulsion drive excited with permanent magnets has been presented in this work.</p> <p>The designing parameters which shall be optimised in electromagnetic dimensioning consists of pole number, stator winding and also placing, dimensions and materials of the permanent magnets. The nominal point of the synchronous motor, the outer diameter of the stator and also the axial length of the stator core have been fixed for the basis of the dimensioning.</p> <p>The comparison between surface-, radial- and v-magnetised 20 MW synchronous motor with forced air cooling carried out with a Finite Element Method program is being presented. No load point, nominal point and from transient states the 2- and 3-phase short-circuit situations are being researched while the attention is being aimed e.g. avoiding the demagnetisation of the permanent magnets.</p> <p>When using direct seawater cooling instead of a forced air circulation is the cooling of the unit based of the heat transmission to the surrounding water. In this kind of a solution is the heat transmission much more weaker compared to the forced air cooling. For that reason is a developing of a thermal network being presented for this kind of a shrink fit propulsion drive unit and also a limit value for the unit size of a synchronous motor is being found.</p> <p>Also a fundamental theory of the heat transmission, construction of the synchronous motor and the properties of a propulsion drive motor is being presented.</p>			
Keywords:	Propulsion drive, synchronous machine, permanent magnet, thermal network		

ALKULAUSE

Tämä työ on tehty ABB Industry Oy:ssä Machines Groupin tahtikone divisioonassa tuotekehitysosastolla ajanjaksolla 01/2001 - 07/2001. Kiitän kaikkia työn valmistumiseen vaikuttaneita henkilöitä. Erityisesti työn mahdollistamisesta tahtikoneiden tuotekehityspäällikköä Jouni Jaakkolaa sekä Machines Groupin teknologiakeskuksen päällikköä Juhani Manteretta, työn ohjaajaa Miikka Hakulia kriittisestä palautteesta ja parannusehdotuksista sekä Jan Westerlundia saamistani lukuisista neuvoista. Työn valvojaa professori Asko Niemenmaata kiitän opastuksesta ja innostavasta asenteesta lopputyötäni kohtaan.

Lisäksi suurkiitos Susannalle ymmärtämyksestä ja tuesta työn aikana sekä vanhemmilleni ja sisarelleni vuosien kannustuksesta.

Espoossa 6.8.2001



Tuomas Laitinen

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	4
SISÄLLYSLUETTELO.....	5
SYMBOLILUETTELO	7
1 JOHDANTO.....	10
2 RUORIPOTKURIMOOTTORIT	11
3 KESTOMAGNETOITU TAHTIKONE.....	14
3.1 KESTOMAGNEETIT	15
3.2 TARKASTELTAVAT ROOTTORIGEOMETRIAT	16
4 TAHTIKONEEN HÄVIÖLÄHTEET.....	18
4.1 VIRTALÄMPÖ- ELI RESISTIIVISET HÄVIÖT	18
4.2 RAUTAHÄVIÖT.....	19
4.3 MEKAANISET HÄVIÖT	20
4.4 MUUT HÄVIÖT	21
5 LÄMPÖTEORIA.....	22
5.1 YLEISTÄ.....	22
5.2 LÄMMÖNSIIRTYMINEN.....	22
5.2.1 Johtuminen	22
5.2.2 Konvektio.....	23
5.2.3 Säteily.....	26
5.3 LÄMPÖLASKENTA	27
5.3.1 Elementtimenetelmä	28
5.3.2 Lämpöverkot.....	30
6 SÄHKÖMAGNEETTINEN MITOITUS	31
6.1 ROOTTORIGEOMETRIAT	32
6.2 SUUNNITTELUVAATIMUKSET JA -PARAMETRIT	34
6.2.1 Napaluku	35

6.2.2	<i>Vyyhdenleveys</i>	36
6.2.3	<i>Staattorin tehollisten johdinkierrosten sekä rinnakkaisten haarojen lukumäärä</i>	36
6.2.4	<i>Staattoriuran mitat</i>	37
6.2.5	<i>Ilmaväli</i>	37
6.2.6	<i>Kestomagneetit</i>	37
6.3	LASKENTAMENETELMÄT	38
6.4	LASKENTATULOKSIA	39
6.5	JATKOTARKASTELU	44
6.5.1	<i>Staattorin mitoitus uudelle napaluvulle</i>	44
6.5.2	<i>Laskentatulokset</i>	44
6.5.3	<i>Häviövertailu</i>	46
6.5.4	<i>2- ja 3-vaiheinen oikosulku</i>	48
6.5.5	<i>Vääntömomentti nimellisasteessa ja tyhjäkäyntijännitteen yliaaltosisältö</i>	50
6.5.6	<i>Roottorigeometrian valinta</i>	52
6.5.7	<i>Sähkömagneettinen mitoitus suoraan merivesijäähdytykseen</i>	55
7	TERMINEN MITOITUS	57
7.1	LEVYSYDÄMEN ALUEEN LÄMPÖVERKKO	58
7.2	LASKENTATULOKSET LEVYSYDÄMEN ALUEELLA	59
7.3	LAAJENNETTU LÄMPÖVERKKO	61
7.4	TULOKSET LAAJENNETULLA LÄMPÖVERKOLLA	62
8	YHTEENVETO	64
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	65
10	LÄHTEET	66

SYMBOLILUETTELO

A	johtimen poikkipinta-ala
A_k	kiinteän pinnan pinta-ala
A_{1p}, A_{2p}	pintojen 1 ja 2 pinta-alat
A_2	keskimääräinen lämmönsiirtopinta-ala levysydämessä urajakoa kohti
A_3	keskimääräinen lämmönsiirtopinta-ala podin vaipassa urajakoa kohti
A_4	keskimääräinen lämmönsiirtopinta-ala podin vaipan pinnalla urajakoa kohti
B	magneettivuontiheys
\hat{B}	magneettivuontiheyden huippuarvo
B_r	remenanssivuontiheys
B_{12}	staattorin uran leveys (liite 2)
B_2	staattorin uraeristeen paksuus (liite 2)
c_p	virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetti
C_e	pyörrevirtahäviöiden laskennassa käytettävä vakio
C_{Hy}	hystereesihäviöiden laskennassa käytettävä vakio
D_{11}	staattorin ulkohalkaisija
D_{12}	staattorin sisähalkaisija
E	staattorin rinnakkaisten haarojen lukumäärä (yhtälö 6.1)
f	taajuus
G_r	Grashoffin luku (yhtälö 5.10)
h	konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin
H	magneettikentänvoimakkuus
H_k	koersitiivikentänvoimakkuus
H_{13}	staattorin uran suoran osan korkeus (liite 2)
H_2	vyyhtien välisen eristekerroksen paksuus (liite 2)
I	sähkövirta
I_r	roottorin magnetoimisvirta
I_v	staattorin vaihevirran tehollisarvo
J	sähkövirran tiheys
k	lämmönjohtavuus
l	johtimen pituus
L	staattorin levysydämen pituus
m	vaiheluku
N_i	solmupisteeseen i liittyvä muotofunktio
N_{ux}	Nusseltin luku (yhtälö 5.8)
O	staattorin tehollisten johdinkierrosten lukumäärä (yhtälö 6.1)
p	napapariluku
p_h	häviötehotiheys
P_e	pyörrevirtahäviöt
P_{FeTe}	puolikkaan hampaan rautahäviöt
P_{FeTh}	hampaan rautahäviöt levysydämen alueella

P_{FeYo}	staattorin selän rautahäviöt levysydämen alueella
P_{hLl}	staattorin resistiiviset häviöt levysydämen alueella
P_{Hy}	hystereesihäviöt
P_k	staattorin virtalämpöhäviöt
P_m	magnetoimishäviöt
P_r	roottorin kokonaishäviöt
P_{rt}	Prandtlin luku (yhtälö 5.4)
P_{stCu}	staattorin resistiiviset häviöt + roottorin häviöt jaettuina uraa sekä vyyhtien lukumäärää kohti
P_{stCo}	yhden vyyhdenpään resistiiviset häviöt
P_{stFe}	staattorin selän rautahäviöt urajakoa kohti
q	lämpövirran tiheys
q_1	vakoluku
Q	lämpövirta
Q_1	uraluku
R	resistanssi
R_{conv}	konvektiivinen lämpöresistanssi podin pinnasta mereen
R_{CoAi}	konvektiivinen lämpöresistanssi vyyhdenpääpinnalta päädyn ilmatilaan
R_{CoPo}	konvektiivinen lämpöresistanssi päädyn ilmatilasta podin sisäpintaan
R_{CoSe}	konvektiivinen lämpöresistanssi podin pinnasta mereen vyyhdenpääalueella
R_d	lämpöresistanssi puolikkaan hampaan yli
R_e	Reynoldsin luku (yhtälö 5.3)
R_{InCo}	lämpöresistanssi vyyhdenpään eristekerroksen yli
R_{ins1}	lämpöresistanssi uraeristeen yli uran pohjalla
R_{ins2}	lämpöresistanssi uraeristeen yli uran sivuilla
R_{ins3}	lämpöresistanssi vyyhtien välissä olevan eristeen yli
R_k	konvektiivinen lämpöresistanssi
R_{podh}	lämpöresistanssi podin vaipan yli
R_{PoCo}	lämpöresistanssi podin vaipan yli vyyhdenpääalueella
R_r	napakäämin resistanssi
R_{sf}	lämpöresistanssi puristusliitoksen yli
R_{yoke}	lämpöresistanssi staattoriselän yli
R_{zx}	lämpöverkossa solmupisteiden $z - x$ välinen lämpöresistanssi
R_1	staattorin vaiheresistanssi toimintapisteen lämpötilaan redusoituna
s	podin rungon paksuus (liite 2)
T	lämpötila
T_e	ilmavälimomentti
T_{max}	huippumomentti
T_N	vääntömomentti nimellispisteessä
T_s	kiinteän pinnan lämpötila
T_1, T_2	pintojen 1 ja 2 lämpötilat
T_∞	vapaan virtauksen lämpötila
U	jännite
U_f	lineaarinen sisäjännite
U_s	staattorin liitinjännite

v	virtaavan aineen nopeus
V	sähköpotentialiaali
w_p	painofunktio
W	vyyhdenleveys
x	puristusliitoksen paksuus (liite 2)
x_d	pitkittäinen tahtireaktanssi (suhteellisarvo)
X_d	pitkittäinen tahtireaktanssi
x_q	poikittainen tahtireaktanssi (suhteellisarvo)
X_q	poikittainen tahtireaktanssi
x_k	karakteristinen mitta (yhtälö 5.3)
x_1	staattorin vaiheen hajareaktanssi (suhteellisarvo)
Z_{ave}	keskimääräinen hampaan paksuus
α_e	säteilystä pintaan absorboituva osuus (yhtälö 5.11)
α_s	säteilyn lämmönsiirtymiskerroin
α_{t1}	lämpötilakerroin
α_1	lämmönsiirtymiskerroin podin ulkopinnasta mereen
β	tilavuuden lämpötilakerroin
δ	napakulma
δ_θ	termisen rajakerroksen paksuus (yhtälö 5.9)
ε_i	pinnan i säteilyluku
θ	lämpötila
$\Delta\theta$	lämpötilaero
ι	säteilyn pinnasta heijastunut osuus (yhtälö 5.11)
λ	aallonpituus
λ_x	puristusliitoksen lämmönjohtavuus (liite 2)
λ_1	podin rungon lämmönjohtavuus (liite 2)
λ_2	levysydämen radiaalinen lämmönjohtavuus (liite 2)
λ_3	eristeen lämmönjohtavuus (liite 2)
ν	virtaavan aineen kinemaattinen viskositeetti
ρ	resistiivisyys
ρ_v	virtaavan aineen tiheys
σ_s	sähkönjohtavuus
τ	säteilystä pinnan läpäissyt osuus (yhtälö 5.11)
ω	kulmataajuus

1 JOHDANTO

Ruoripotkuriyksiköitä on asennettu onnistuneesti jo useita vuosia jäänmurtajiin, loistoristeilijöihin, sota-aluksiin, autolauttoihin, tankkereihin, kaapelinlaskualuksiin sekä myös kelluviin porauslauttoihin ja moniin muihin sovelluksiin. Kehitys on kulkenut voimakkaasti eteenpäin markkinoiden huomattua ruoripotkurijärjestelmän tehokkuuden verrattuna perinteisiin akselivetoisiin järjestelmiin. Tällä hetkellä alan tuotekehityksessä ollaan kiinnostuneita kestromagnetoiduista suuritehoisista yksiköistä, joilla olisi suuri sähkömagneettinen vääntömomentti magneettien tilavuutta kohti, alhaiset ääni- sekä värinäominaisuudet, alhaiset kustannukset ja hyvä tehokerroin.

Tämän työn tarkoituksena on mitoittaa suuritehoinen (20 MW), kestromagnetoitu ruoripotkurimoottori sekä sähkömagneettisesti että termisesti. Ruoripotkuriyksikkö asettaa suunnittelulle tietyt raja-arvot, joiden puitteissa mitoitus on suoritettava. Pyrkimys käytettävän tilavuuden minimoimiseen ja tehon kasvattamiseen johtaa häviöiden lisääntymiseen, jotka on pystyttävä erityyppisillä jäähdytysratkaisuilla siirtämään pois yksiköstä. Tämä ei ole yksinkertainen tehtävä ja suunnittelussa joudutaan tekemään kompromisseja, jotta halutut sähkömagneettiset ominaisuudet saavutetaan ilman liian suurta lämpenemää, mikä saattaisi pahimmassa tapauksessa johtaa kestromagneettien demagnetoitumiseen eli niiden pysyvään magneettisten ominaisuuksien häviämiseen. Lisäksi kalliit materiaalikustannukset (muun muassa kestromagneetit) on pystyttävä minimoimaan, mekaaninen puoli huomioitava puhumattakaan itse koneen valmistettavuudesta, joka on luonnollisesti ehdoton edellytys onnistuneessa suunnitteluprosessissa. Näin ollen suunnittelutyö on kaiken kaikkiaan erittäin monitahoinen prosessi ja onnistuminen siinä antaa yritykselle hyvät lähtökohdat menestymiseen markkinoilla ja kilpailutilanteissa.

2 RUORIPOTKURIMOOTTORIT

1980-luvun lopulla alettiin kehittää laivoihin propulsiojärjestelmää, joka perustui laivan perään vesirajan alapuolelle asennettavaan ruoripotkuriyksikköön. Näin ollen perinteiset akselivetoiset järjestelmät korvattaisiin ruoripotkurijärjestelmillä, joilla saavutettaisiin huomattavia etuja aikaisempiin ratkaisuihin verrattuna.

Akselivetoisissa järjestelmissä pääpropulsio synnytetään laivan konehuoneen dieselmoottorilla, josta momentti siirretään pitkällä akselilla laivan perään potkurille, jonka yhteydessä on myös laivan ohjaamiseen käytettävä peräsin. Mikäli käytetään hitaita moottoreita (80-200 rpm) voidaan potkuri kytkeä suoraan akselille, mutta suuremmilla nopeuksilla joudutaan käyttämään lisäksi alennusvaihteistoja.

Sähköisten ruoripotkurijärjestelmien toimintaperiaate on seuraavanlainen. Sähköä tuotetaan koko laivan tarpeisiin (ilmastointi, lämmitys, valaistus, sähkölaitteet) ja propulsiomoottoreille tahtigeneraattoreilla, joita dieselmoottorit pyörittävät. Laivan perään (myös eteen tai sivuille järjestelmästä riippuen) asennetussa ruoripotkuriyksikössä sijaitsee pääpropulsiomoottori, joka on joko hidas tahti- tai epätahtikone ja jonka kanssa samalla lyhyellä akselilla on potkuri. Moottori on hidas nopeudeltaan siksi, että erillistä alennusvaihteistoa ei käytetä ruoripotkurijärjestelmissä. Sähkomoottoria syötetään taajuusmuuttajalla, joka useimmiten on joko syklokonvertteri tai PWM-taajuusmuuttaja. Ruoripotkuriyksikkö on kiinnitetty laivan runkoon siten, että se pystyy kääntymään vertikaalisen akselinsa ympäri 360°. Yksikön kääntäminen haluttuun suuntaan tapahtuu hydraulimoottoreiden avulla. Laaja käännettävyyden edellyttää sitä, että teho on siirrettävä yksikköön pyörivien liukurenkaiden avulla. Mittaus- ja ohjaussignaalit voidaan siirtää sen sijaan optisten kuitujen välityksellä.

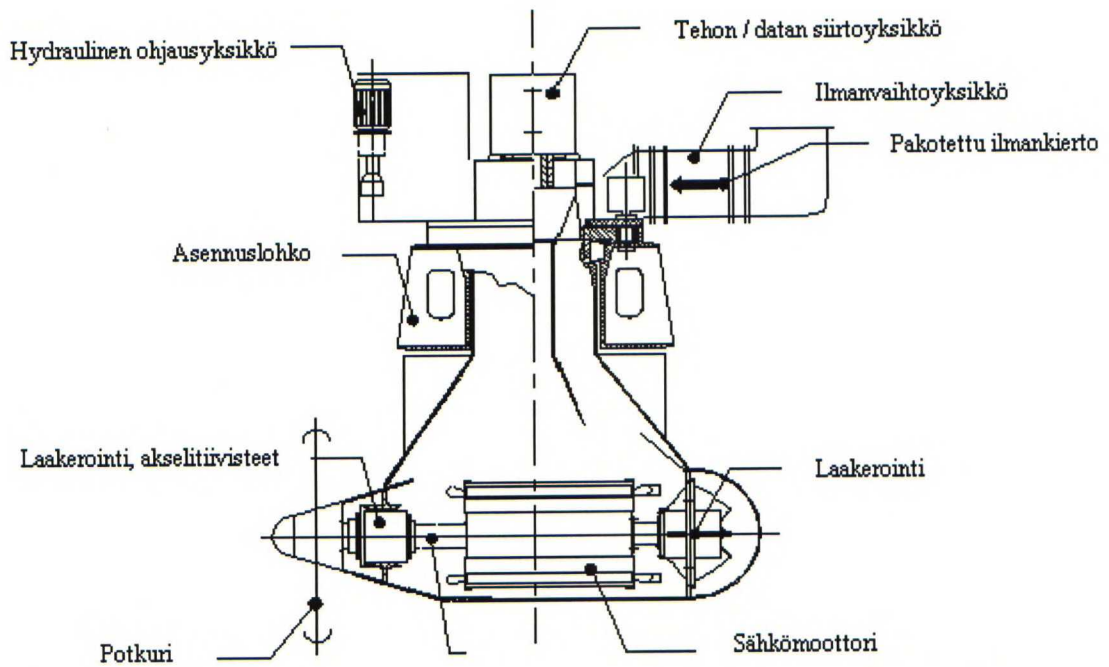
Ruoripotkuriyksikön jäähdytysratkaisuja on lukuisia ja niiden soveltuvuutta on tutkittu muun muassa diplomityössä /Uotila, H., 1996/. Yleisin ratkaisu suurissa teholuokissa lienee pakotettu ilmankierto. Tällöin jäähdyttävä ilma tuodaan yksikköön erillisestä laivan peräosassa sijaitsevasta jäähdytyshuoneesta ja johdetaan ruoripotkuriyksikön kaulan ulommaisia kanavia pitkin sähkomoottorin päihin ja edelleen ilmapäliin jäähdyttäen matkalla sekä staattorin vyyhdenpäitä että roottorin ja staattorin käämityksiä. Staattorin radiaalisten solien kautta ilma kulkeutuu erilliseen

kuorisolaan, josta edelleen kaulan keskimmäisiä kanavia pitkin takaisin lämmönvaihtimelle.

Edellä kuvatulla ruoripotkurijärjestelmällä saavutetaan seuraavia merkittäviä etuja akselivetoon verrattuna:

- Huomattavasti parempi ohjattavuus[✓], koska koko moottorin työntövoima saadaan kohdistettua haluttuun suuntaan eikä peräsintä tarvita. Samalla laivan kääntösäde pienenee huomattavasti. ✓
- Nimellinen momentti molempiin pyörimissuuntiin koko nopeusalueella ja näin ollen laivan erinomainen hallinta myös pienillä nopeuksilla sekä esimerkiksi hätäpysäytyksessä.
- Erillisiä perän trusterimoottoreita, alennusvaihteistoja ja pitkää akselia konehuoneesta potkurille ei tarvita, minkä johdosta ruoripotkurijärjestelmillä on huomattavasti paremmat ääni- ja värinäominaisuudet.
- Dieselmoottoreita voidaan käyttää koko ajan optimaalisella pyörimisnopeudella mikä parantaa hyötysuhdetta, säästää konetta, vähentää päästöjä ja pienentää polttoaineenkulutusta.
- Pitkän akselin ja moottorin poistuminen laivan sisältä vapauttaa tilaa rahtitavaralle, matkustamohyteille tai vaihtoehtoisesti mahdollistaa pienemmän laivan yksikkökoon samalla rahti- /matkustajamäärällä.
- Ruoripotkuriyksikkö voidaan asentaa erittäin myöhäisessä rakennusvaiheessa (noin 2 viikkoa ennen vesillelaskua).

Poikkileikkaus pakotetulla ilmankierrolla jäähdytettävästä ruoripotkuriyksiköstä ja sen järjestelmistä on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Pakotetulla ilmankierrolla jäähdytettävä ruoripotkuriyksikkö.

Kohdeyrityksen ensimmäinen ruoripotkuriyksikkö (1,5 MW) asennettiin vuonna 1990 huoltoalus Seiliin, useiden vuosien tuotekehityksen jälkeen. Vuoden 2000 kesäkuussa ylitettiin 183 000 kumulatiivisen käyttötunnin merkkipaalu ja käyttömäärä kasvaa edelleen voimakkaasti.

3 KESTOMAGNETOITU TAHTIKONE

Tahtikoneen staattorissa on kolmivaihekäämitys, joka on sijoitettu 0,5 mm paksuisista dynamolevyistä muodostetun levysydämen ilmavälipinnalla oleviin uriin ja jonka tavoitteena on synnyttää ilmaväliin mahdollisimman sinimuotoinen virtakatejakauma. Käämitys voidaan sijoittaa, joko yhteen tai kahteen kerrokseen, joista jälkimmäinen antaa lisää vapauksia mahdollistaen muun muassa jänteistykseen, jolla tiettyjä yliaaltoja voidaan pienentää, jopa poistaa. Levysydän on ladottu kasaan siten, että rakenne jakaantuu osapaketteihin, joiden välissä on radiaalisia jäähdytyssolia. Suuritehoisissa yksiköissä virrat nousevat suuriksi ja näin ollen staattorin johtimet joudutaan virranahdon pienentämiseksi jakamaan rinnakkaisiksi osajohtimiksi, joiden paikkoja vuorotellaan urissa.

Ilmavälin magneettikenttä synnytetään roottorista käsin. Perinteinen ratkaisu perustuu magnetointikäämitykseen, johon syötetään tasavirtaa. Haittapuolina ovat syntyvät resistiiviset häviöt, jotka lämmittävät roottoria ja näin ollen edellyttävät lisäjäähdytystä. Magnetointi voidaan toteuttaa joko harjallisesti tai harjattomasti. Edellinen perustuu liukurenkaiseen ja niitä vasten nojaaviin harjoihin, joiden kautta tasavirta syötetään napapyörän käämitykseen ulkopuolisesta magnetointilaitteesta. Jälkimmäisessä menetelmässä pieni vaihtovirtageneraattori on rakennettu tahtikoneen akselille, jonka pyöriävästä ankkurista saadaan diodisillan kautta magnetoimisvirta. Ruoripotkuriyksiköitä ajatellen haittana voidaan virtalämpöhäviöiden lisäksi pitää apukoneen vaatiman tilan tarvetta, mikä pyritään ratkaisuihin minimoimaan.

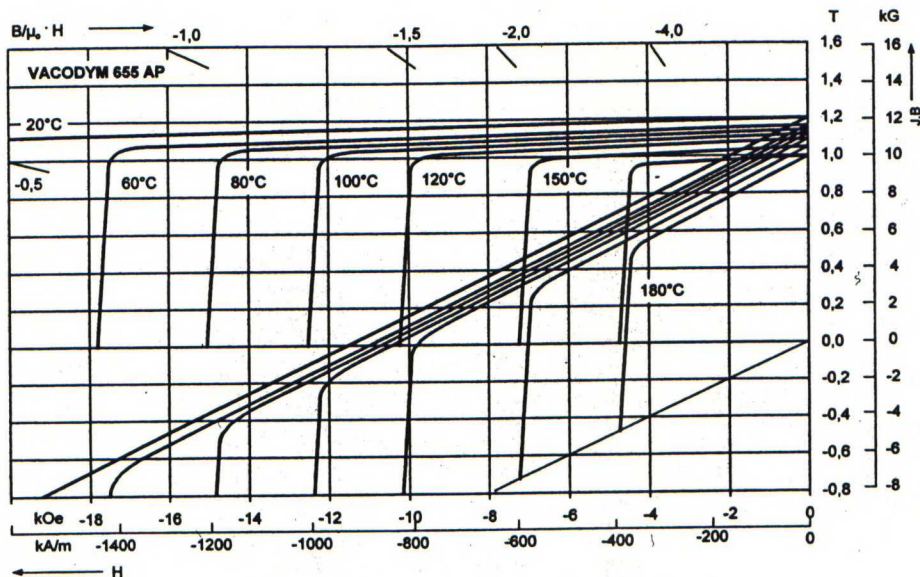
Toinen vaihtoehto tarvittavan magneettikentän synnyttämiseksi on roottoriin sijoitettavien kestopagneettien hyväksikäyttö, joiden määrä on verrannollinen syntyvän kentän voimakkuuteen. Magneetit voidaan asettaa roottoriin halutulla tavalla, joko kehän pinnalle tai roottorisylinterin sisälle. Näin ollen kone voidaan suunnitella valinnan mukaan joko avo- tai umpinapakoneen tyyppiseksi. Eri tyyppisiä roottorigeometrioita kestopagneettien sijoittelun osalta on tarkasteltu muun muassa diplomitoissa /Nahkuri, V., 1998, Alasuvanto, T., 1990/. Apukoneesta ja magnetointikäämityksestä voidaan kestopagneetoinnin ansiosta nyt luopua, jolloin resistiivisiä häviöitä roottorissa ei enää synny. Ainoina häviökomponentteina esiintyy enää yliaaltojen synnyttämät lisähäviöt. Tämä johtaa jäähdytyksen pääpainon

siirtymiseen staattorin puolelle. Toisaalta siirryttäessä kestopagneettien käyttöön menetetään mahdollisuus loistehon säätöön. Lisäksi roottorin asentaminen staattoriin muodostuu vaikeammaksi magneettikentän energian pyrkiessä minimoitumaan ja magneettisten voimien vetäessä roottoria staattorin sisään. Rakenteen yksinkertaisuus ja etenkin häviöiden oleellinen putoaminen ovat kuitenkin merkittäviä etuja suunniteltaessa ruoripotkurijärjestelmiä.

3.1 Kestomagneetit

Kestomagneettien ominaisuuksia voidaan kuvata hystereesisilmukan avulla. Pehmeillä aineilla silmukka on kapea toisin kuin magneettisesti kovilla aineilla, jotka omaavat leveän hystereesisilmukan. Erityisesti silmukkaa käytetään toisen neljänneksen negatiivisen magnetoinnin alueella, jota kutsutaan myös demagnetoitumiskäyräksi. Kyseisestä käyrästä saadaan kestopagneettien pääominaisuuksia kuvaavat suureet kuten remananssivuontiheys (B_r), koersitiivikentänvoimakkuus (H_k) ja energiatulon maksimiarvo $|BH|_{\max}$ eli energiatiheys. Kuvan 2 mukaisesti voidaan magneettiipiiriä kuormittaa palautuvasti käyrän lineaarisella osalla aina niin sanottuun polvipisteeseen asti. Kun tämä piste ylitetään alkaa kestopagneettien palautumaton demagnetoituminen.

Lämpötilan nousulla on merkittäviä vaikutuksia magneettisiin ominaisuuksiin, mikä havaitaan kuvasta 2. Lämpötilan kasvaessa remananssivuontiheys ja koersitiivikentänvoimakkuus pienenevät, joista jälkimmäinen johtaa polvipisteen heikkenemiseen ja täten kestopagneettien pysyvän demagnetoitumisen vaara kasvaa. Toisaalta liiallinen lämpötilan nousu aiheuttaa magneettisten ominaisuuksien pysyvän häviämisen, kun aineelle ominainen Curie lämpötila ylitetään.



Kuva 2. Lämpötilan vaikutus kestopagneettien ominaisuuksiin.

Kestomagneettien synnyttämät alhaisemmat ilmavälivuontiheydet verrattuna perinteisiin magnetointikäymityksiin sekä niiden korkea hinta ovat olleet pitkään rajoittavia tekijöitä niiden hyödyntämiseen sähkökonesovelluksissa. Viime aikoina tuotekehitys on kuitenkin mennyt voimakkaasti eteenpäin alentaen kestopagneettien hintoja ja parantaessa niiden pääominaisuuksia, mikä on synnyttänyt kiinnostuksen suuritehoisten kestopagneettimoottorien kehitykseen.

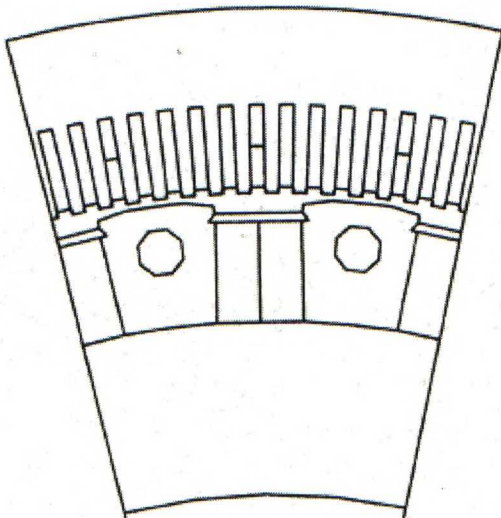
Tuotantotekniikan kehittyminen on tuonut markkinoille uusia tehokkaampia magneettimateriaaleja. Näistä parhaimmat ominaisuudet sähkökonesovelluksia ajatellen on saavutettu NdFeB (Neodium 20-30% Rauta 66% Boori 1%) seoksella, jolla on suurempi energiatulo kuin aikaisemmin käytetyllä kalliilla, hauraalla sekä harvinaisella SmCo:lla. NdFeB materiaalin heikkona kohtana voidaan pitää koersitiivikentänvoimakkuuden huomattavasti voimakkaampaa lämpötilariippuvuutta kuin SmCo:lla. Pysyvän demagnetoitumisen aiheuttava Curie lämpötila on NdFeB:lle noin 300-330 °C kun taas Sm₂Co₁₇:lle noin 800 °C.

3.2 Tarkasteltavat roottorigeometrit

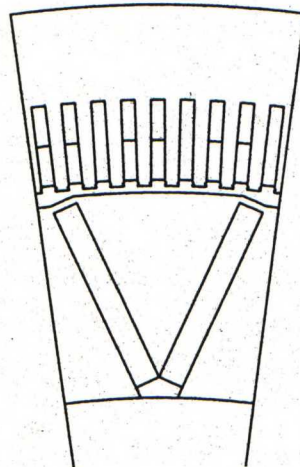
Vuon kulkusuunnan perusteella sähkökoneet voidaan jakaa radiaali-, aksiaali- ja transversaali vuokoneisiin. Tässä työssä keskitytään ainoastaan radiaalivuoperiaatteella toimiviin ratkaisuihin, joiden toiminta perustuu ilmavälin radiaaliskuuntaisesti ylittävään vuohon sekä aksiaaliskuuntaisesti kulkevaan momenttia tuottavaan virtaan. Roottorigeometrit käsittävät pysty-, pinta- ja v-magnetoinnin. Tässä työssä pystymagnetoinnilla viitataan kuvan 3 mukaiseen rakenteeseen, jossa

kestomagneetit upotetaan roottorisylinterin sisälle radiaalisesti napalevyjen väliin. Magneettien asennus napalevyjen väliin jääviin koloihin ja lukitus kiiloilla on selkeä sekä luotettava rakenne ja samalla vältetään pintamagneettien kiinnitysongelmalta. Napalevyt kiinnitetään roottorisylinteriin niiden keskiosassa olevaa aukkoa hyödyntäen. Pintamagnetoinnilla tarkoitetaan kuvan 4 mukaista rakennetta, jossa kestomagneetit sijoitetaan roottorisylinterin pinnalle. Yksittäisen kaarevan magneetin valmistaminen on kustannuksiltaan kallista, joten useimmiten käytetään osapalasista muodostuvaa kokonaisuutta kuvan mukaisesti. Kuvan 5 tapaus esittää v-magnetointia roottoria, jossa magneetit ovat upotettu roottorisylinterin sisään v-kirjaimen muotoon.

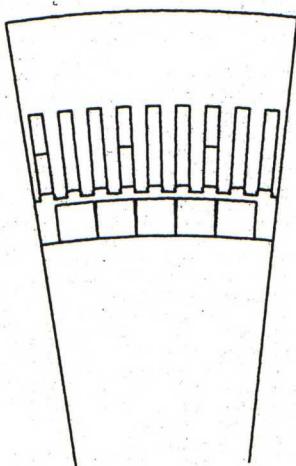
Kaikkien geometrioiden kestomagneettien osalta magnetoinnin suunta on lyhyimmän särmän suuntainen.



Kuva 3. Roottorin pystymagnetointi.



Kuva 5. Roottorin v-magnetointi.



Kuva 4. Roottorin pintamagnetointi.

4 TAHTIKONEEN HÄVIÖLÄHTEET

Tahtimoottori toimii energiamuuntimena muuttaen sähköverkosta ottamansa sähkötehon mekaaniseksi tehoksi. Muutosprosessi ei ole ideaalinen ja näin ollen tahtimoottori kuluttaa osan sähköverkon antamasta tehosta tehohäviöihin, jotka lämmittävät konetta. Täten niiden mahdollisimman tarkka määrittäminen on tärkeää laskettaessa koneen lämpenemää esimerkiksi lämpöverkon avulla, jossa tehohäviöt kohdistetaan niiden syntymispaikkaan lämpövirtalähteiksi.

4.1 Virtalämpö- eli resistiiviset häviöt

Virtalämpöhäviöt ovat kuormituksesta riippuvia ja niitä syntyy sekä staattorin ankkurikäämityksessä että roottorin magnetointikäämityksessä. Useimmiten roottorissa syntyvistä resistiivisistä häviöistä käytetään nimitystä magnetoimishäviöt.

Kolmivaihekoneissa staattorin virtalämpöhäviöt saadaan laskettua yhtälöllä

$$P_k = 3R_1 I_v^2, \quad 4.1$$

missä I_v tarkoittaa vaihevirran tehollisarvoa ja R_1 vaiheen tasavirtaresistanssia redusoituna eristysluokan määräämään toimintalämpötilaan.

Vaihtovirta aiheuttaa staattorin johtimissa virranahtoa, jonka suuruus riippuu johtimen poikkipinta-alasta, virrantiheydestä ja syöttötaajuudesta. Usein johtimet jaetaan rinnakkaisiksi toisistaan eristetyiksi osajohtimiksi, jolloin on perusteltua käyttää tasavirtaresistanssia häviöiden laskuun virranahdon merkityksen oleellisesti pudotessa. Haittapuolena menettelyssä on täytekertoimen huononeminen.

Sähkökoneissa yleisimmin käytetyt johtimet on valmistettu joko kuparista tai alumiinista. Kyseisten johtimien resistanssi muuttuu miltei suoraviivaisesti laajalla lämpötila-alueella $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, joka käsittää sähkökoneissa syntyvät lämpötilavaihtelut. Vakiopoikkipintaisen johtimen resistanssi voidaan laskea johtimen pituuden l , poikkipinnan A ja käytetyn johdin aineen resistiivisyyden ρ avulla seuraavanlaisesti

$$R = \rho \frac{l}{A}. \quad 4.2$$

Redusointi toimintalämpötilaan saadaan ominaisresistanssin lineaarisen riippuvuuden perusteella laskettua seuraavalla yhtälöllä

$$\rho_2 = \rho_1(1 + \alpha_{11}(T_2 - T_1)), \quad 4.3$$

missä ρ_1 ja ρ_2 ovat johtimen ominaisresistanssit lämpötiloissa T_1 ja T_2 sekä α_{11} johdin aineen lämpötilakerroin lämpötilassa T_1 . Lämpötilakertoimet α alumiinille ja kuparille ovat 0,0037 1/K ja 0,0039 1/K.

Kun magnetoimisvirtaa I_r syötetään tahtikoneen roottorin magnetointikäännytykseen syntyy napakäämin resistansseissa R_r virtalämpöhäviöitä, joita kutsutaan magnetoimishäviöiksi P_m . Näihin häviöihin lasketaan kuuluvan myös tahtimoottorin käynnistysvastuksissa että magnetoinnin säätövastuksissa syntyvät tehohäviöt.

4.2 Rautahäviöt

Rautahäviöt ovat kuormituksesta riippumattomia häviöitä, jotka voidaan jakaa hystereesihäviöihin ja pyörrevirtahäviöihin. Perustaajuisia rautahäviöitä syntyy ainoastaan staattorin raudassa, koska roottori pyörii tahtikoneissa samalla nopeudella kuin staattorin magneettikenttä. Perustaajuuksien lisäksi koneissa esiintyy myös yliaaltoja, jotka aiheuttavat rautahäviöitä lisähäviöinä myös roottoriin.

Hystereesihäviöt ovat suoraan verrannollisia taajuuteen ja vaihtomagnetoinnilla mitatun hystereesisilmukan pinta-alaan, joka likipitäen suoraan verrannollisesti kasvaa vuontiheyden B huippuarvon neliöön. Vuontiheyden huippuarvon eksponentti vaihtelee todellisuudessa välillä 1,6...2,4 riippuen magneettiipiiriin käytetystä rautalajista ja näin ollen kyllästysasteesta mutta käytännössä lausekkeessa käytetään neliöllistä huippuarvoa.

Hystereesihäviöille voidaan muodostaa yhtälö /Niemenmaa, A., 1989/, jonka käytännöllinen merkitys rajoittuu ainoastaan siihen miten eri tekijät vaikuttavat häviöihin.

$$P_{Hy} = C_{Hy} \hat{B}^2 f, \quad 4.4$$

missä C_{Hy} on vakio.

Muutos magneettikentässä indusoi staattorin levysydämeen jännitteen, joka aikaansaa sähkövirran Lenzin lain mukaisesti. Näitä virtoja kutsutaan pyörrevirroiksi

ja niiden synnyttämiä häviöitä pyörrevirtahäviöiksi, jotka ovat suoraan verrannollisia indusoituneen jännitteen neliöön. Koska toisaalta tämä jännite on suoraan verrannollinen taajuuden ja vuontiheyden huippuarvon tuloon, saadaan pyörrevirtahäviöille yhtälön 4.4 kaltainen lauseke /Niemenmaa, A., 1989/, jossa C_e on vakio.

$$P_e = C_e \left(\hat{B} f \right)^2 \quad 4.5$$

Kokonaishäviöiksi levysydämen osalta saadaan siten /Niemenmaa, A., 1989/

$$P = C_{Hy} \hat{B}^2 f + C_e \left(\hat{B} f \right)^2, \quad 4.6$$

joka muodostuu samanaikaisesti esiintyvien hystereesi- ja pyörrevirtahäviöiden summasta.

4.3 Mekaaniset häviöt

Sähkökoneissa syntyvä lämpö on pystyttävä poistamaan koneesta, jotta välttyään kriittisten osien ylikuumenemisilta. Tähän tarkoitukseen käytetään usein koneen kanssa samalle akselille kytkettäviä tuulettimia ja täten puhutaan itsejähdyttämisestä. Näin voidaan toimia erityisesti silloin, kun koneen pyörimisnopeus on vakio tai ei vaihtelee laajalla alueella. Mikäli pyörimisnopeuden vaihtelut ovat suuria on toinen vaihtoehto vierasjäähdyttäminen. Tällä tarkoitetaan jäähdytysratkaisua, jossa tuulettimen käyttövoima ei tule itse jäähdytettävästä laitteesta.

Roottorin mekaaniset häviöt perustuvat pyörimisliikkeessä syntyviin laakerihäviöihin ja toisaalta ilmahankaushäviöihin. Mikäli napakäämi magnetoidaan harjallisesti syntyy hiiliharjojen hangatessa liukurenkaita vasten lisäksi kitkahäviöitä.

Paikallisesti syntyvän lämpenemän lisäksi akselilla oleva tuuletin, roottorissa syntyvä mekaaninen kitka sekä harjahankaushäviöt aiheuttavat koneelle lisäkuormaa, mikä johtaa kuormitusvirran ja näin ollen myös resistiivisten häviöiden kasvuun.

4.4 Muut häviöt

Sähköisiä häviöitä ovat myös eristeiden dielektriset häviöt, jotka ovat kuitenkin täysin merkityksettömiä muihin häviölähteisiin verrattuina ja ne voidaan täten jättää huomioimatta.

Muun muassa staattoriurituksen aiheuttama permeanssin vaihtelu ja epäsinimuotoinen syöttöjännite synnyttävät uraharmonisia yliaaltoja, jotka aiheuttavat pintahäviöitä ja hampaiden pulsaatiohäviöitä.

5 LÄMPÖTEORIA

5.1 Yleistä

Sähkökoneiden terminen mitoittaminen perustuu eristysluokkiin, joissa jokaisessa on tarkasti määritelty käämitykselle korkein sallittu keskilämpötila ja kuumimman mitattavissa olevan pisteen lämpötila. Tämä siksi, että jo 8-12 °C liiallinen lämpötilan nousu lyhentää eristeiden eliniän puoleen /Paloniemi, P., Keskinen, E., 1996/. Tämän johdosta eristykset on jaettu lämpöluokkiin, jotka on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Sähkökoneiden eristysluokat standardin IEC 60034-1 mukaan.

Määritelmät	Eristysluokka		
	B	F	H
Sallittu ”kuumimman pisteen” lämpötila / °C	130	155	180
Sallittu vastusmittauksen avulla määritelty käämityksen lämpötila / °C	120	145	165
Sallittu käämityksen lämpenemä / °C, kun ympäristön korkein lyhytaikainen lämpötila on + 40 °C	80	105	125

5.2 Lämmönsiirtyminen

Lämpö siirtyy kappaleesta ympäristöön johtumalla, konvektiolla tai säteilemällä pyrkimyksenä paikallisten lämpötilaerojen tasoittaminen. Luonteenomaista lämpötilalle on lisäksi se, että virtaus on aina alenevan lämpötilagradientin suuntaan /Jokinen, T., 1999/. Jokaiselle siirtymistavalle on omat lakinsa ja näin ollen laskettaessa sähkökoneen lämpenemiä lämpöverkon avulla joudutaan lämpöresistanssit määrittämään koneen eri osissa juuri siellä vallitsevan lämmönsiirtymistavan lakeja noudattaen.

5.2.1 Johtuminen

Kiinteissä aineissa sekä paikallaan seisovissa kaasuissa ja nesteissä tapahtuvaa lämpötilaeron synnyttämää lämmönsiirtymistä kutsutaan johtumiseksi. Kyseiselle ilmiölle on ominaista se, että lämpöliikkeen kineettinen energia siirtyy värähtelevältä molekyyliltä toiselle ja näin ollen lämmönsiirtyminen on molekyyliä välittämää. Johtumisilmiö edellyttää siis aineen osasten ehdotonta paikallaan pysymistä, kuten

kiinteissä kappaleissa. Näin olleen nesteissä ja kaasuissa pelkkää johtumista esiintyy harvoin ja se on mahdollista lähinnä tilanteissa, joissa kitka estää mahdolliset virtaukset tukahduttaen luonnollisen konvektion. Tällaisia liikkumattomia kerroksia voi syntyä vain ahtaissa kanavissa ja raoissa /Wagner, W., 1994/.

Lämmön siirtyessä johtumalla saadaan lämpöverkkolaskentaan lämpöresistanssiksi /Jokinen, T., 1999/

$$R = \frac{1}{k} \int_0^l \frac{dx}{A(x)}, \quad 5.1$$

missä k on väliaineen lämmönjohtavuus.

Yksittäisen johdinmateriaalin lämmönjohtavuudelle löytyy kirjallisuudesta useita arvioita. Sen sijaan esimerkiksi sähkökoneen käämityksen lämpenemää tarkasteltaessa ja lämpöverkkoa laadittaessa tullaan tilanteeseen, jossa samalla alueella on lämmönjohtavuuksiltaan hyvinkin erityyppisiä materiaaleja, joiden läpi tapahtuva lämpötilan kulku on erittäin vaihtelevaa. Tällaisessa tilanteessa ei ole tarkoituksenmukaista laatia jokaiselle materiaalille omaa laskentaverkkoa vaan ratkaisuna toteutetaan alueen homogenisointi. Tällä menettelyllä tarkoitetaan esimerkiksi käämityksen korvaamista homogeenisella aineella, jonka lämpöresistanssi on sama kuin todellisen epähomogeenisen johdinkerroksen lämpöresistanssi.

Ajallisesti stationaarisessa tilassa voidaan lämmönjohtuminen kuvata myös Fourierin lain avulla kolmiulotteisessa tapauksessa seuraavasti

$$\bar{q} = -k \nabla T = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \bar{k} \right), \quad 5.2$$

missä \bar{q} on lämpövirran tiheyden vektori ja ∇T lämpötilan gradientti eli lämpövirran suuntaan tapahtuva lämpötilan lasku pituusyksikköä kohti.

5.2.2 Konvektio

Kaasun tai nesteen virratessa kiinteää pintaa pitkin muodostuu pinnan lähelle virtausrajakerros, jossa virtausnopeus v kasvaa nolasta arvoon v_∞ . Symbolilla ∞ pyritään kuvaamaan vapaan virtauksen ominaisuuksia. Kerroksen syntyminen perustuu siihen, että virtauksen hiukkasten ja kiinteän pinnan tullessa kosketuksiin putoaa pintakerroksen kanssa kosketuksissa olevien hiukkasten nopeus nolaaan

kitkan vaikutuksesta. Tämän jälkeen kyseiset hiukkaset pyrkivät hidastamaan yläpuolisessa kerroksessa olevien partikkelien liikettä ja näin edelleen jatkuen kunnes vaikutus riittävän pitkälle mentäessä muuttuu merkityksettömäksi. Siirryttäessä virtaavan aineen ja pinnan vuorovaikutuksen alkamispisteestä pinnan suuntaisesti eteenpäin kasvaa rajakerroksen paksuus, mikä johtuu viskositeetin tunkeutumisesta syvemmälle vapaaseen virtaukseen.

Virtausrajakerroksen pinnassa vallitsee laminaarinen virtaus, joka lämpövirran on läpäistävä johtumalla. Tämän tyyppiselle virtaukselle on tyypillistä virtauksen yhtenäisyys ja säännönmukaisuus. Kun virtausrajakerros kasvaa tietyn suuruiseksi muuttuu virtaus laminaarisen pintavirtauksen yläpuolella turbulenttiseksi, jolle ominaista on epäsäännöllisyys sekä voimakas pyörteisyys ja täten myös tehokkaampi jäähdyttävä vaikutus. Se, onko virtaus laminaarista vai turbulenttista määräytyy Reynoldsin luvun perusteella, jolle tasolevyn yhteydessä voidaan kirjoittaa $Re_{L,krit} \approx 3 \cdot 10^5$ kun taas putkivirtaukselle pätee $Re_{ed,krit} \approx 2300$ /Wagner, W., 1994/. Yleisessä muodossa Reynoldsin yhtälö voidaan esittää muodossa

$$R_{ex} = \frac{vx_k}{\nu}, \quad 5.3$$

missä ν on liikkuvan aineen kinemaattinen viskositeetti, v virtausnopeus ja x_k karakteristinen mitta, joka riippuu kiinteän pinnan tyypistä.

Toisaalta virtaavalla kaasulla tai nesteellä saattaa olla eri lämpötila kiinteään pintaan verrattuna. Tällöin muodostuu virtausrajakerroksen lisäksi terminen rajakerros, jolle tunnusomaista on virtaavan aineen lämpötilan muuttuminen pinnan lämpötilasta ympäristön lämpötilaan. Vastaavasti kuten virtausrajakerroksenkin yhteydessä siirryttäessä kontaktipisteestä pintaa pitkin edemmäs virtauksen suuntaan kasvaa termisen rajakerroksen paksuus. Samalla pintaa vastaan kohtisuora lämpötilagradientti pienenee lämpötilaeron pysyessä kuitenkin vakiona ja täten lämmönsiirtymiskerroin pienenee yhtälön 5.6 mukaisesti. Tämä tekee siitä paikallisesti erittäin vaihtelevan suureen, mikä tekee suuruuden arvioimisen suhteellisen vaikeaksi.

Termisen- ja virtausrajakerroksen välistä suhdetta kuvaa Prandtin luku

$$P_{\pi} = \frac{\nu c_p \rho_v}{k}, \quad 5.4$$

missä c_p on virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetti ja ρ_v aineen tiheys. Mikäli Prandtin luku on 1 ovat virtausrajakерros ja terminen rajakerros yhtä paksuja.

Konvektiivisen lämmönsiirtymisen yhteydessä saadaan lämpövirran tiheydelle yhtälö /Incropera, F.P., DeWitt, D.P., 1996/

$$q = h(T_s - T_\infty) = -k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}, \quad 5.5$$

missä T_s ja T_∞ ovat kiinteän pinnan ja vapaan virtauksen lämpötilat.

Nyt konvektiiviselle lämmönsiirtymiskertoimelle h saadaan

$$h = \frac{-k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}}{T_s - T_\infty}. \quad 5.6$$

Yksinkertaiselle geometrialle ja laminaarivirtaukselle on lämmönsiirtymiskertoimen laskennallinen määrittäminen mahdollista noudattaen fysikaalisia peruslakeja. Sen sijaan monimutkaiselle geometrialle ja turbulenttivirtaukselle laskentaa ei pystytä suorittamaan ja näin ollen joudutaan käyttämään empiirisesti saatuja tutkimustuloksia arvioitaessa kertoimen suuruutta. Sähkökoneiden yhteydessä tilanne on juuri jälkimmäinen.

Lämpöverkon laatimista varten tarvitaan konvektiossa lämpövirran kohtaama siirtymäresistanssi kiinteästä pinnasta, jonka pinta-ala A_k , jäähdyttävään aineeseen ja se saadaan seuraavalla kaavalla /Jokinen, T., 1999/

$$R_k = \frac{\Delta\theta}{q A_k} = \frac{1}{h A_k}, \quad 5.7$$

missä $\Delta\theta$ on vallitseva lämpötilaero.

Konvektiivisen lämmönsiirtymiskertoimen h määrittämiseen käytetään Nusseltin lukua, jolle pätee yhtälö /Wagner, W., 1994/

$$N_{ux} = \frac{x_k}{\delta_\theta}, \quad 5.8$$

missä x_k on kiinteän aineen karakteristinen mitta ja δ_θ termisen rajakerroksen paksuus. Lämmönsiirtymiskerroin h saadaan nyt yhtälöstä

$$h = N_{ux} \frac{k}{x_k}. \quad 5.9$$

Nusseltin luku riippuu voimakkaasti aineen fysikaalisista ominaisuuksista, virtausnopeudesta ja virtauskanavan mitoista. Se saadaan funktiona Reynoldsin, Prandtin, Grashoffin luvuista sekä tietysti tilanteen karakterisista mitoista.

Grashoffin luvulla kuvataan joustavuuden suhdetta viskoosivoimiin ja sille voidaan esittää yhtälö

$$G_r = \frac{gL^3 \beta (T_s - T_\infty)}{\nu}, \quad 5.10$$

missä β on tilavuuden lämpötilakerroin ja g maan vetovoiman synnyttämä kiihtyvyys.

5.2.3 Säteily

Termisellä säteilyllä tarkoitetaan energian siirtymistä sähkömagneettisten aaltojen välityksellä. Aallonpituusalueena, joka käsittää lämpösäteilyn, pidetään aluetta $\lambda = 0,6...400 \mu\text{m}$ /Wagner, W., 1994/.

Energian säilymislain perusteella voidaan kappaleeseen tulevalle säteilylle kirjoittaa

$$\iota + \alpha_e + \tau = 1, \quad 5.11$$

missä ι on säteilyn heijastunut, α_e absorboitunut ja τ pinnan läpäissyt osuus.

Termisen säteilyn siirtämälle lämpövirran tiheydelle kahden eri lämpötilassa T_1 ja T_2 olevan pinnan välillä voidaan Stefan-Boltzmannin lain perusteella esittää yhtälö /Jokinen, T., 1999/

$$q = \varepsilon_r \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad 5.12$$

missä σ on Stefan-Boltzmannin vakio $5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)]$ ja ε_r pintojen välinen resuitoiva säteilyluku. Tilanteessa, jossa pinnasta A_{1p} lähtevä säteily kohtaa kokonaisuudessaan pinnan A_{2p} , saadaan säteilyluku laskettua yhtälöstä

$$\frac{1}{\varepsilon_r} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_{1p}}{A_{2p}} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right), \quad 5.13$$

missä pintojen säteilyluvut ovat vastaavasti ε_1 ja ε_2 .

Lämpöverkkoa varten säteilyn lämpöresistanssiksi saadaan

$$R_s = \frac{1}{\alpha_s A_{lp}}, \quad 5.14$$

missä säteilyn lämmönsiirtymiskerroin α_s saadaan yhtälöstä

$$\alpha_s = \frac{q}{T_1 - T_2}. \quad 5.15$$

Laskettaessa sähkökoneiden lämpenemiä, voidaan säteilyn vaikutus jättää huomioimatta. Tämä on täysin perusteltua, koska koneissa vallitsevat lämpötilat ovat säteilyn kannalta alhaisia ja näin ollen syntyvät lämpövirrantiheydet pieniä verrattuna konvektioon ja johtumiseen. Lisäksi näin meneteltäessä ollaan suunnittelussa vielä turvallisella alueella lopputulosten osalta.

5.3 Lämpölaskenta

Tahtikoneen lämpötilajakaumaa laskettaessa keskitytään tässä työssä ainoastaan pysyvän tilan lämpenemiin eli tarkastellaan stationaarista lämpövirtauskenttää, jossa ei ole ainevirtauksia. Tällaisessa tilanteessa tunnetaan häviötehotiheys p_h , joka aiheuttaa lämpövirrantiheyden q .

Kyseisen lämpövirrantiheyden q määrää lämpötilan θ synnyttämä potentiaalikenttä /Luomi, J., 1994/

$$q = -k \nabla \theta, \quad 5.16$$

missä k on lämmönjohtavuus.

Toisaalta lämpövirrantiheydelle q pätee divergenssiyhtälö

$$\nabla \cdot q = p_h, \quad 5.17$$

jolloin yhdistämällä yhtälöt 5.16 ja 5.17 saadaan stationaarisen lämpökentän osittaisdifferentiaaliyhtälöksi

$$\nabla \cdot (k \nabla \theta) = -p_h. \quad 5.18$$

Jos edelleen lämmönjohtavuus k on vakio, saadaan

$$k \nabla^2 \theta = -p_h. \quad 5.19$$

Reunaehtoina käytetään Dirichlet'n reunaehtoa

$$\theta = \bar{\theta} \quad 5.20$$

tai Cauchyn reunaehtoa, jossa h on pinnan lämmönsiirtymiskerroin

$$k \frac{\partial \theta}{\partial n} = -\bar{q} - h\theta. \quad 5.21$$

Yhtälöt 5.16, 5.17 ja 5.18 muistuttavat erittäin paljon sähkökentän lausekkeitä kuten yhtälöistä 5.22 - 5.24 voidaan havaita. Tämä perustuu sähkö- ja lämpökentän välillä vallitsevaan sivun 30 taulukon 2 mukaiseen analogiaan.

Sähkökentässä pätee Ohmin lain differentiaalimuoto

$$J = -\sigma_s \nabla V \quad 5.22$$

sekä varauksen häviämättömyyttä kuvaava jatkuvuusyhtälö

$$\nabla \cdot J = \frac{-\partial \rho}{\partial t}. \quad 5.23$$

Yhdistettynä saadaan sähkökentän osittaisdifferentiaaliyhtälöksi

$$\nabla \cdot (\sigma_s \nabla V) = \frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad 5.24$$

5.3.1 Elementtimenetelmä

Elementtimenetelmä (Finite Element Method, FEM) on numeerinen laskentamenetelmä, jolla ratkaistaan reunaehtoja sisältäviä osittaisdifferentiaaliyhtälöitä. Sen hyödyntäminen on kasvanut voimakkaasti 1950-luvulta, jolloin sitä käytettiin lähinnä kimmo- ja lujuusopin tehtävien ratkaisuun. Tämä on perustunut pitkälti työasemien laskentatehon voimakkaaseen kasvamiseen sekä myös matemaattisten perusteiden kehittämiseen ja täten johtanut menetelmän soveltamiseen monilla tekniikan aloilla, myös termodynaamisissa ongelmissa.

Elementtimenetelmän perusideana on se, että tutkittava alue jaetaan elementteihin eli pieniin osa-alueisiin, joissa tarkasteltavaa suuretta approksimoidaan yksinkertaisilla funktioilla. Useimmiten nämä ovat ensimmäisen, toisen tai kolmannen asteen polynomeja. Esimerkkinä voidaan ottaa yksinkertainen lineaarinen kolmioelementti termodynaamisessa ongelmassa. Elementin sisällä lämpötila korvataan tasomaisella funktiolla ja täten kolmion reunalla lämpötila on interpolaatio kärkipisteiden

lämpötilojen välillä. Lämpötilan approksimaatiolle koko tarkasteltavassa alueessa saadaan

$$\theta = \sum_{j=1}^n N_j(x, y) \theta_j, \quad 5.25$$

missä muotofunktiot N_j interpoloivat lämpötilan arvoa solmupisteiden välillä.

Osa-alueisiin eli elementteihin jako toteutetaan siten, että käsiteltävän alueen on oltava kauttaaltaan elementtien peittämä mutta päällekkäisyyksiä ei sallita. Lisäksi vaaditaan, että mikäli alueessa on eri väliaineita, tulee niiden rajapinnat olla elementtien rajapinnoilla /Luomi, J., 1994/.

Kun nyt stationaarisen lämpökentän osittaisdifferentiaaliyhtälöä 5.18 ratkaistaan elementtimenetelmällä, käytetään niin sanottua painotettujen residuaalien menetelmää. Se perustuu likimääräisen ratkaisun etsimiseen tietystä funktiojoukosta niin, että seuraava termodynaamiseen tilanteeseen sovitettu painotetun residuaalin yhtälö toteutuu

$$R = \int_{\Omega} w_p [-\nabla \cdot (k \nabla \theta) - p_h] d\Omega = 0, \quad 5.26$$

missä alue Ω voi olla kaksi- tai kolmiulotteinen.

Kun nyt otetaan huomioon yllä esitetyt Dirichlet'n ja Cauchyn reunaehdot sekä käytetään Galerkinin menetelmän mukaisesti painofunktioina w_p muotofunktioita N_i , saadaan lineaarinen yhtälöryhmä

$$S T = f, \quad 5.27$$

josta tuntemattomien solmuarvojen vektori T voidaan ratkaista. Matriisien alkiot ovat

$$S_{ij} = \int_{\Omega} k (\nabla N_i) \cdot (\nabla N_j) d\Omega, \quad i, j = 1, \dots, n. \quad 5.28$$

$$f_i = \int_{\Omega} p_h N_i d\Omega, \quad i, j = 1, \dots, n. \quad 5.29$$

5.3.2 Lämpöverkot

Huomattavasti perinteisempi tapa ratkaista häviötehoja sisältävän koneen lämpötilajakaumia perustuu sähkövirtausanalogiaan. Tällä tarkoitetaan taulukon 2 /Jokinen, T., 1999/ mukaista sähkö- ja lämpökentän suureiden välillä vallitsevaa yhteyttä, minkä nojalla voidaan tarkasteltavaan alueeseen muodostaa sähköverkon kaltainen lämpövastusverkko, joka ratkaistaan tutun piirianalyysin keinoin Kirchhoffin lakeja noudattaen.

Menetelmän etuina elementtiratkaisuihin nähden voidaan pitää laskenta-ajan oleellista putoamista kuitenkin tarkkuuden liikaa kärsimättä. Lisäksi lähes kaikki laskentaan tarvittavat parametrit saadaan koneen fysikaalisista tai sähkömagneettisista mitoituksista ja lämmönsiirtymiskäyrästä.

Virheitä lämpölaskentaan aiheuttaa konvektiivisen lämmönsiirtymiskertoimen määrittämisessä vallitseva epävarmuus, tunnettujen tehohäviöiden tarkkuuden rajallisuus ja niiden tarkan kohdistamisen ongelma lämpöverkkoon etenkin lisähäviöiden osalta.

Taulukko 2. Sähkö- ja lämpölaskennan välillä vallitseva analogia.

Lämpövirtaus	Sähkövirtaus
Lämpövirta Q [W]	Sähkövirta I [A]
Häviötehotiheys p_h [W/m ³]	Sähkövaraustiheys ρ [C/m ³]
Lämpövirran tiheys q [W/m ²]	Sähkövirran tiheys J [A/m ²]
Lämpötila θ [K]	Sähköpotentiaali V [V]
Lämpötilaero $\Delta\theta$ [K]	Jännite U [V]
Lämmönjohtavuus k [W/mK]	Sähkönjohtavuus σ_s [1/ Ω m]
Lämpöresistanssi R [K/W]	Sähköresistanssi R [Ω]

6 SÄHKÖMAGNEETTINEN MITOITUS

Sähkömagneettisen mitoituksen tavoitteena oli suunnitella kestmagnetoitu tahtimoottori, jonka akseliteho on 20 MW, nimellisjännite 3 kV, pyörimisnopeus 140 rpm ja tehokerroin $\cos \varphi = 0,95$ ind. Parannettaessa tehokerrointa tästä edelleen saadaan staattorin resistiivisiä häviöitä pienennettyä ja sähkömagneettista hyötysuhdetta täten paremmaksi mutta kalliin kestmagneettimateriaalin tarve toimintapisteen saavuttamiseksi on merkittävästi suurempi. Täten kokonaisuutta ajatellen on optimaalista hieman tinkiä tehokertoimesta. Staattorin ulkohalkaisijaksi on valittu 2300 mm, mikä perustuu mahdollisuuteen hyödyntää jo olemassa olevia runkorakenteita. Lisäksi vertailtaessa eri roottorigeometrioilla toteutettuja ratkaisuja keskenään oletetaan jäähdyttämisen perustuvan pakotettuun ilmankiertoon, jota on aikaisemminkin käytetty lähes näin suurten yksikkökokojen jäähdytysratkaisuna. Tällöin staattoriin tulee radiaalisia jäähdytyssoleja ja vakiomoottoripituudella joudutaan hieman tinkimään levysydämen raudan määrästä. Tarvittava jäähdytys on kenties mahdollista toteuttaa myös suoralla merivesijäähdytyksellä, jossa staattorin selkä puristusliitetään suoraan podin sisäpintaan ja jäähtyminen perustuu lämmönsiirtymiseen ympäröivään meriveteen. Tähän mennessä ratkaisua on käytetty pienemmissä yksiköissä aina 5 MW asti. Etuna saavutetaan samaan moottorin pituuteen nähden suurempi rautatilavuus solien poistuttua ja täten pienentynyt kestmagneettitarve nimellispisteeseen pääsemiseksi. Lisäksi kuorisolan poistuttua yksikön ulkohalkaisija pienenee ja kaulaa on mahdollista ohentaa ilmankiertokanavien tullessa tarpeettomiksi. Tämä johtaa hydrodynaamisen hyötysuhteen paranemiseen. Tutkittavaksi jää riittääkö näin toteutettu jäähdytys pitämään lämpenemät sallituissa rajoissa.

Koneen perusmitoitus tehdään analyttisellä ohjelmistolla, jolla staattori mitoitetaan halutuksi sekä lisäksi saadaan alustavia tuloksia koneesta muun muassa vuontiheyksien, reaktanssien ja häviöiden osalta. Kestomagneettikoneen ollessa kyseessä ei tässä vaiheessa keskitytä vielä lainkaan roottoripuoleen ja sen magnetointiin, koska kohdeyhteyksen analyttisellä ohjelmistolla pystytään laskemaan ainoastaan perinteisiä roottorigeometrioita. Annettujen mittojen perusteella ohjelma valmistaa datan syötteen elementtimenetelmään perustuvalle jatko-ohjelmalle, jossa määritellään roottorigeometria kestmagneettien ja

materiaalimäärittysten osalta tarkemmin. Tämän jälkeen lasketaan koneen toiminta tyhjäkäynnissä, nimellisessä kuormitustilanteessa ja muutostiloissa. Mikäli tulokset eivät ole tyydyttäviä palataan takaisin optimoimaan suureita kunnes tahtimoottori täyttää sille asetetut vaatimukset.

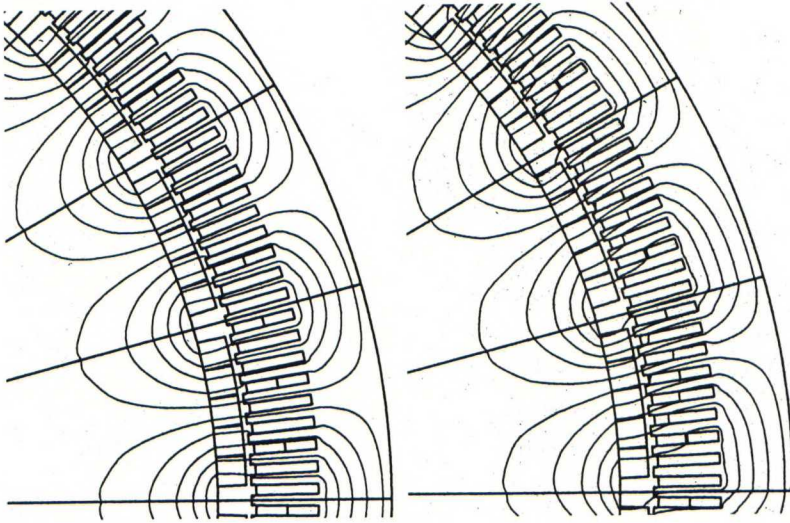
6.1 Roottorigeometriat

Pintamagnetoinnissa kestopagneetit sijoitetaan roottorisylinterin pinnalle. Pinta-asennuksen seurauksesta magneetit altistuvat kahta muuta rakennetta huomattavasti enemmän demagnetoiville voimille ja yliaaltojen synnyttämille pyörrevirroille. Ilmiöitä pystyttäisiin pienentämään vaimennussauvoilla mutta tähän malliin niiden sijoittaminen on mahdotonta.

Pystymagnetoinnissa magneetit ovat hyvin suojattuina demagnetoivilta voimilta ja pyörrevirtojen aiheuttamilta häviöiltä. Valmistuksen kannalta haittapuolena voidaan pitää tarvetta epämagneettiselle roottorirenkaalle, johon magneetit kiinnitetään ja jolla estetään kestopagneettien vuon sulkeutuminen roottorisydämen kautta.

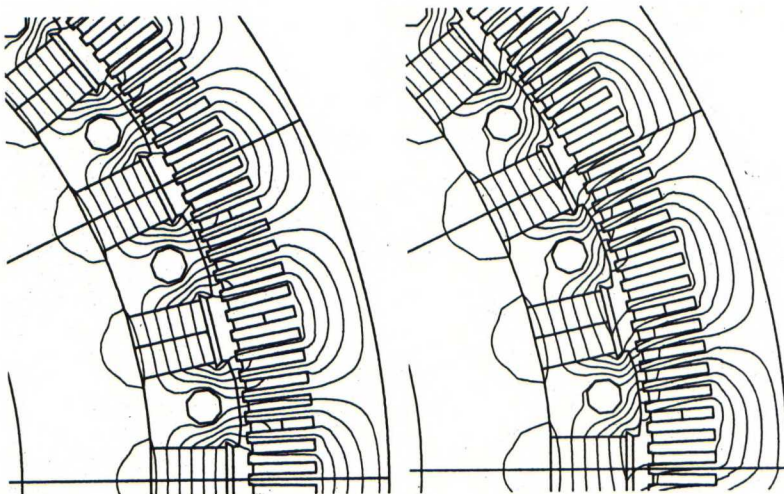
V-magnetoinnilla pyritään saavuttamaan suurempia ilmavälivuontiheyksiä lisäämällä magneettista pinta-alaa napajaon alueella. Mallissa on lisäksi mahdollisuus vaimennuskäämien hyväksikäyttöön, jotka vaimentavat muutosilmiöitä ja suojaavat kestopagneetteja. Tahtikoneen toiminta saadaan täten paremmin seuraamaan käytön syöttöarvoja. Tällä ei tosin laivakäytöissä ole niin suurta merkitystä kuin esimerkiksi valssikäytössä, jossa säädön on toteuduttava huomattavasti tarkemmin. Tästä syystä niitä ei lähdetty laskennassa mallintamaan.

Vuon kulku eri roottorigeometrioille tyhjäkäynnissä ja nimellisessä kuormitustilanteessa on esitetty kuvissa 6 - 8.



Kuva 6. Pintamagnetoidun tahtimoottorin vuon kulku tyhjäkäynnissä ja nimellispisteessä.

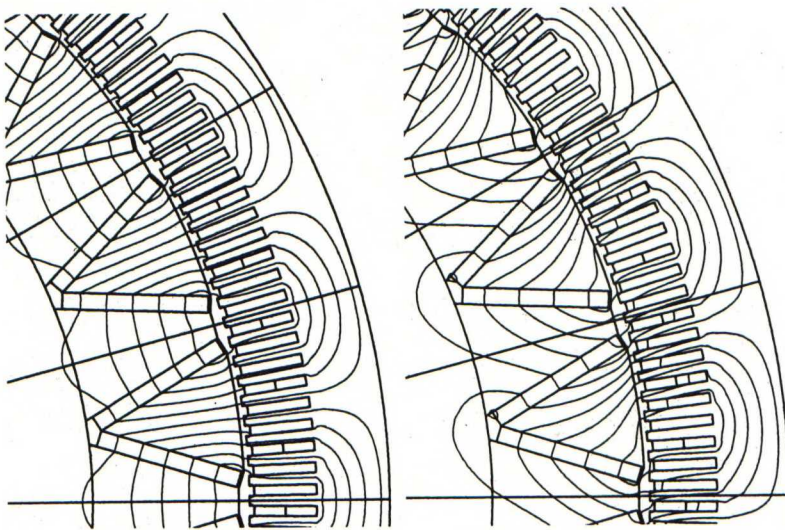
Pintamagnetoidulla tahtimoottorilla vuon kulku on sekä tyhjäkäynnissä että nimellispisteessä tasaista eikä hajavuota esiinny, minkä ansiosta ratkaisulla saadaan kahteen muuhun geometriaan verrattuna huomattavasti enemmän momenttia. Haittapuolena voidaan pitää pinta-asennuksen seurauksena voimakasta altistumista vastamagnetoiville voimille, jotka muutostiloissa nousevat usein demagnetoitumista aiheuttavalle tasolle.



Kuva 7. Pystymagnetoidun tahtimoottorin vuon kulku tyhjäkäynnissä ja nimellispisteessä.

Pystymagnetoinnin haittapuolena voidaan pitää sekä tyhjäkäynnissä että nimellispisteessä esiintyvää roottorirenkaan kautta sulkeutuvaa hajavuota, joka ei osallistu momentin synnyttämiseen. Tyhjäkäynnissä vuon kulku näyttää muuten

hyvältä samoin kuin nimellispisteessäkin lievää lähellä ilmapälipintaa esiintyvää vuon oikaisua huomioimatta.



Kuva 8. V-magnetoidun tahtimoottorin vuon kulku tyhjäkäynnissä ja nimellispisteessä.

Tyhjäkäyntikuvan perusteella v-magnetointi näyttäisi varsin hyvältä vaihtoehdolta. Vuon kulku on tasaista eikä hajavuota esiinny. Sen sijaan kuormituksen kasvaessa lievää hajavuota alkaa muodostumaan magneettien kiinnityspisteessä lähellä roottorisylinteriä. Tämän lisäksi magneettien terävät kulmat altistuvat voimakkaasti vastamagnetoivalle kentälle, mikä laskennassa näyttää johtavan kulmien demagnetoitumiseen. Lisäksi osa vuosta näyttäisi nimellispisteessä sulkeutuvan vain toisen navan alueella sijaitsevan magneetin läpi, mikä heikentää syntyvää momenttia.

6.2 Suunnitteluvaatimukset ja -parametrit

Parhaan mahdollisen roottorigeometrian ja kokonaisratkaisun löytämiseksi oli tarpeen asettaa kriteereitä, jotka moottorin tulisi täyttää. Vertailtaessa eri roottorigeometrioilla toteutettuja ratkaisuja keskenään oletetaan jäähdyttämisen perustuvan pakotettuun ilmankiertoon. Tämän nojalla annettiin sähkömagneettiselle hyötysuhteelle vaatimus olla vähintään raja-arvon 0,980 yläpuolella, jotta jäähdytyslaitteistoa ei tarvitse mitoittaa kohtuuttoman suureksi. Kestomagneettien sijoittelu eri roottorigeometrioissa on hyvinkin toisistaan poikkeavaa ja näin ollen myös napakulma nimellispisteessä tulee vaihtelevaan tahtireaktanssien suuruuseroista johtuen. Mitoituksen tavoitteeksi asetettiin kuitenkin, että napakulma ei kasvaisi astelukua 50 suuremmaksi. Tahtimoottorin huippumomentille annettiin vaatimus olla vähintään 30 % nimellistä suurempi. Nimellispisteessä

vääntömomentin tulisi olla mahdollisimman tasainen, jotta laivan värinäominaisuudet saadaan minimaalisiksi. Yliaaltosisällön osalta tulee tahtikoneen tyhjäkäyntijännitteen uraharmonisia yliaaltoja painottavan särökertoimen THF täyttää sille asetettu vaatimus ja alittaa täten arvo 1,5 %. Lisäksi kokonaiskustannusten minimointi on kilpailukyvyn ylläpitämiseksi ehdottoman tärkeää, joten kallis kestopagneettimateriaalitarve on pyrittävä minimoimaan. Muutosilmiöiden osalta kestopagneettien on lisäksi kestävä 2- sekä 3-vaiheinen oikosulku demagnetoitumatta oletetussa eristysluokan B mukaisessa käyttölämpötilassa.

Sähkökoneen suunnittelu sisältää kaikkiaan useita kymmeniä määriteltäviä suureita. Mikäli tässä työssä alettaisiin näitä kaikkia optimoimaan, muodostaisi se kohtuuttoman suuren osan työn sisällöstä. Näin olen tietyt arvot kiinnitetty jo valmiiksi ja optimointi keskitettiin tässä työssä staattorin langanvalintaan, kierroslukuihin, napalukuun sekä kestopagneettien sijoitteluun ja dimensioihin. Seuraavassa tarkastellaan tutkittavien parametrien vaikutusta koneen sähkömagneettiseen tilaan.

6.2.1 Napaluku

Roottorin napojen osalta on järkevää keskittyä suuriin napaluvun arvoihin optimoitaessa koneen rakennetta suhteessa kokoon ja painoon. Tämä perustuu siihen, että pienentämällä napajakoa eli toisin sanoen kasvattamalla napalukua voidaan ohentaa sekä roottori- että staattorinselän paksuuksia, vuota kuljettavien osien ollessa suoraan verrannollisia napajakoon. Toisaalta pienempi napajako tarkoittaa myös ohuempia kestopagneetteja, mikä on tärkeää materiaalikustannusten osalta. Vuopolun oheneminen mahdollistaa myös suuremman ilmavälihalkaisijan käytön samalla ulkoisella halkaisijalla, mikä johtaa huippumomentin kasvuun. Lisäksi napaluvun kasvaessa staattorin vyyhdenpäätyt lyhenevät, mikä pienentää resistiivisiä häviöitä.

Napaluvun kasvattamisella ei kuitenkaan ole pelkästään positiivisia vaikutuksia. Kun kasvatetaan napojen määrää, kasvaa vastaavasti myös syöttötaajuus. Tämä johtaa lisääntyneisiin rautahäviöihin, jotka varsinkin pintamagnetoinnin osalta saattavat nousta merkittävään asemaan, niiden kohdistuessa suoraan magneetteihin.

6.2.2 Vyyhdenleveys

Koneen napapariluvun kasvattaminen johtaa tilanteeseen, jossa vyyhdenleveys kapenee. Kone muuttuu tällöin magneettisesti tiukemmaksi. Tämä perustuu vyyhden lävistävän vuon pienenemiseen, jolloin tarvitaan suurempia magneettipiirin vuontiheyksiä saman staattorijännitteen ylläpitämiseksi.

Päinvastaisessa tilanteessa magneettipiirin vuontiheydet pienenevät ja kone muuttuu magneettisesti löysemmäksi. Tilanne on vastaava seuraavassa kuvatun tehollisten johdinkierrosten kasvattamisen kanssa.

6.2.3 Staattorin tehollisten johdinkierrosten sekä rinnakkaisten haarojen lukumäärä

Kasvattamalla staattorin tehollisten johdinkierrosten lukumäärää saavutetaan vaadittu akseliteho paremmalla tehokertoimella, mutta toisaalta suuremmalla napakulmalla roottorin magnetoinnin pysyessä vakiona. Näin ollen nimellispisteen saavuttamiseksi on magnetointia pienennettävä. Kestomagneettitilavuuden pienentyessä roottorin tuottama magnetomotorinen voima heikkenee ja nimellispiste siirtyy edelleen suuremmalle napakulmalle. Seurauksena on koneen muuttuminen magneettisesti löysemmäksi vuontiheyksien pienentyessä. Toisaalta pidettäessä staattorin uramitat vakioina on kuparin poikkipintaa pienennettävä kierroslukumäärän kasvaessa. Tämä johtaa staattorin virrantiheyksien kasvamiseen.

Vastaavasti pienennettäessä tehollisten kierrosten lukumäärää, muuttuu kone magneettisesti tiukemmaksi, jolloin magneettipiirin vuontiheydet kasvavat ja reaktanssit pienenevät. Tällöin tarvitaan kuitenkin lisämagnetointia nimellispisteen saavuttamiseksi, mikä johtaa napakulman pienenemiseen mutta toisaalta huippumomentin kasvuun.

Staattorin rinnakkaisten haarojen lukumäärällä on edelliseen kuvattuna täysin päinvastainen vaikutus. Kasvatettaessa niiden lukumäärää muuttuu kone magneettisesti tiukemmaksi ja vastaavasti pienennettäessä löysemmäksi prosentuaalisesti lähes samassa suhteessa tehollisten kierrosten muutosten kanssa.

Voidaankin esittää seuraava magneettisesti vakiokonetta kuvaava yhtälö

$$O_1 E_2 = O_2 E_1,$$

6.1

missä O_1 ja O_2 ovat tehollisten kierrosten lukumäärät ja E_1 sekä E_2 rinnakkaisten haarojen lukumäärät.

6.2.4 Staattoriuran mitat

Mikäli vain mahdollista, pyritään staattoriuran mitat pitämään vakioina, koska uusien meistien valmistaminen synnyttää aina huomattavia lisäkustannuksia. Jos kuitenkin joudutaan tilanteeseen, jossa vakiomeistit eivät riitä, voidaan nyrkkisääntönä urien muokkauksessa pitää sitä, että hampaan leveyden tulee olla vähintään yhtä suuri kuin uran leveys sekä lisäksi staattoriselän paksuuden tulisi olla riittävän mekaanisen lujuuden saavuttamiseksi uran korkeutta suurempi. Erikoistilanteissa on kuitenkin mahdollista käyttää suhteellisen ohuttakin selän paksuutta suhteessa uran korkeuteen. Tämä edellyttää kuitenkin suurta napalukua ja tarkkoja mekaanisia lukuja laskelmia.

6.2.5 Ilmaväli

Ilmavälin kasvattamisen seurauksena siirtyy nimellispiste pienemmälle napakulmalle, pääreaktanssit pienenevät ja huippumomentti kasvaa. Syynä tähän on lisääntynyt magnetoinnin tarve nimellispisteen saavuttamiseksi. Ilmavälin muutokset ovat usein vain muutaman millimetrin suuruisia ja näin ollen ne voidaan toteuttaa roottorikeskuksen halkaisijaa muuttamalla ilman että koneen symmetria huomattavasti kärsii. Tämä siksi, että staattori- ja roottorimeistien valmistaminen on huomattavasti hankalampaa ja kustannuksiltaan kalliimpaa.

6.2.6 Kestomagneetit

Magneettien mittoja on optimoitu muun muassa diplomitoissa /Nahkuri, V., 1998, Alasuvanto, T., 1990/, joten siihen ei tässä työssä enää tarkemmin syvennyttä. Edellä mainittujen töiden perusteella valittiin kestomagneettien leveydeksi 80 % napajaosta. Kasvattamalla magneettien leveyttä tästä edelleen syntyy hajavuota magneettien välille. Lisäksi ankkurireaktio voimistuu, mikä johtaa pyörrevirtahäviöiden merkittävään kasvuun. Toisaalta 80 % leveydellä momentti on tasaisin ja hyötysuhde vain hieman laskenut huipustaan, joka saavutetaan 75 % leveydellä. Nimellispisteeseen pääsemiseksi tarvitaan roottorin puolelta riittävä magnetomotorinen voima, joka määrää magneettien paksuuden. Tavoitteena on mitoittaa magneetit siten, että nimellispisteessä niiden keskimääräinen vuontiheys on puolet remenanssivuontiheyden arvosta, jolloin energiatiheys on huipussaan.

Lopullisessa mitoituksessa on kuitenkin huomioitava, että valmistajilla on tietyt raja-arvot, joiden puitteissa kestopagneetteja pystytään valmistamaan ja näin ollen kone voidaan joutua suunnittelemaan roottorin magnetoinnin osalta hieman teoreettisista laskelmista poikkeavaksi.

6.3 Laskentamenetelmät

Tahtimoottorin laskenta aloitettiin FEM-ohjelmiston staattisella kenttäratkaisulla, joka perustuu staattorijännitteiden ja virtojen sinimuotoisuusoletukseen. Staattorivirroille voidaan oletuksen pohjalta laskea perusaallot ja täten aika-alue analyysin alkuhetkellä vallitseva kenttä, mikä johtaa jatkuvuustilan saavuttamiseen jo lyhyen laskentajakson jälkeen. Menetelmä ei ota huomioon pyörrevirtoja eikä roottorin pyörimistä staattoriin nähden ja sen pääasiallinen tarkoitus onkin rakennevaihtoehtojen alustava tarkastelu. Lopulliseen analysointiin käytettiin aika-askelmenetelmää, jossa jokaisella askeleella roottoria pyöritetään pyörimisnopeuden sekä annetun askelmäärä/jakso-suhteen määräämän kulman verran eteenpäin ja ilmväliin muodostetaan uusi elementtiverkko roottori- ja staattoriverkon pysyessä muuttumattomana. Alustavassa mitoituksessa käytettiin laskennan nopeuttamiseksi 1. asteen elementtejä ja askelmenetelmässä askelia jaksoa kohti oli 400 kokonaismäärän ollessa 1600. Lopullisessa mitoituksessa ja tarkennetuissa tuloksissa siirryttiin 2. asteen elementtien käyttöön. Laskentaa varten annettiin staattorin ja roottorin lämpötilat eristysluokan B mukaisesti. Käämityksessä esiintyvien kuumien pisteiden johdosta ovat eristeet todellisuudessa F-luokan mukaiset.

Lähtömitoitus laskentaa varten

Eri roottorigeometrioita lähdettiin vertailemaan pitämällä staattori ensin kaikille vakiona. Staattorin käämityksen osalta päädyttiin 2-kerroslimikäämitykseen, vakoluvulla $q_1 = 3$. Tällöin napapariluvulla $p = 12$ saatiin uraluvuksi $Q_1 = 216$. Vyyhdenleveydeksi valittiin $W = 8$ eli päädyttiin 8/9-jänteistykseen, jotta yliaaltosisältöä saadaan hieman rajoitettua.

Magneettitilavuus valittiin sellaiseksi, että pintamagnetoinnilla päästään vaadittuun akselitehoon määrätyllä tehokertoimella ja täten kestopagneettitilavuudeksi saatiin $0,5960 \text{ m}^3$, joka vastaa noin 4500 kg NdFeB-magneettia.

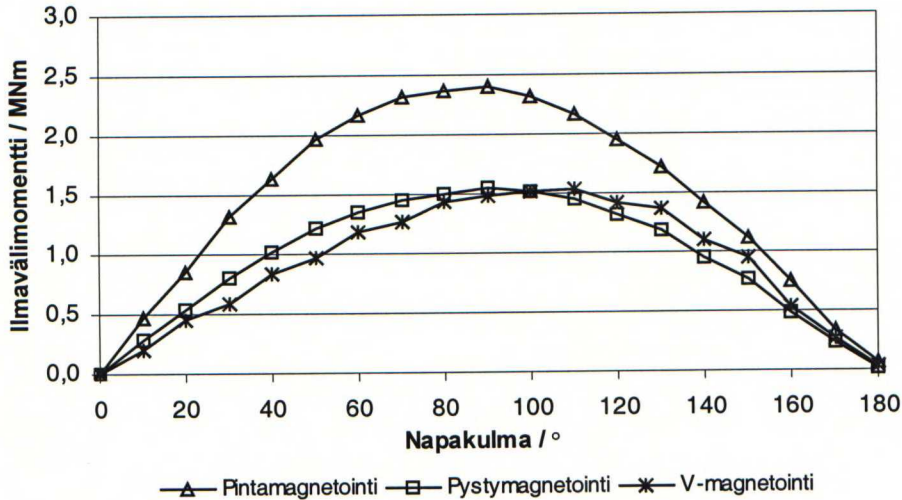
6.4 Laskentatuloksia

Mitoitus aloitettiin laskemalla kaikille geometrioille ilmvälimomentti napakulman funktiona vakio magneettitulavuudella. Avonapaiselle tahtikoneelle ilmvälimomentti saadaan laskettua yhtälöstä

$$T_e = \frac{p}{\omega} m \left[\frac{U_s U_f}{X_d} \sin \delta + \frac{U_s^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right], \quad 6.2$$

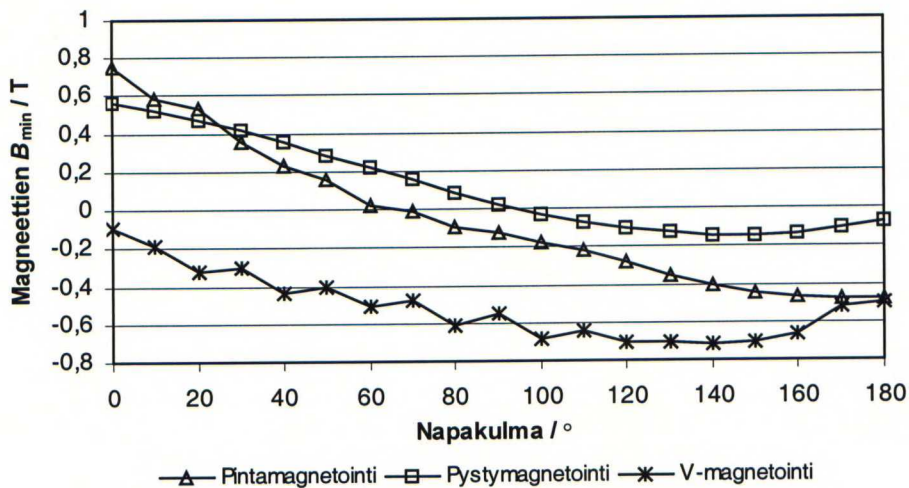
missä momenttilausekkeen jälkimmäinen termi on pitkittäisen X_d ja poikittaisen X_q tahtireaktanssin suuruuserosta syntyvä reluktanssimomentti. Tahtireaktanssien suuruus määräytyy roottorigeometrian ja erityisesti kestomagneettien mittojen ja sijoittelun perusteella.

Kuvasta 9 havaitaan, että pintamagnetoinnilla saavutetaan magneettitulavuuteen nähden selkeästi enemmän momenttia kahteen muuhun geometriaan verrattuna. Tämä perustuu siihen, että lähes koko staattorin vuo saadaan kulkemaan magneettien läpi.



Kuva 9. Ilmvälimomentti napakulman funktiona eri roottorigeometrioilla.

Seuraavaksi laskettiin kestmagneettien minimivuontiheydet napakulman funktiona jokaiselle geometrialle. Tulokset on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Magneettien minimivuontiheys napakulman funktiona eri roottorigeometrioilla.

Minivuontiheyskäyrä ei tietyin osin anna todellista kuvaa magneettien tilanteesta, sillä laskettu arvo ei vallitse kauttaaltaan kestmagneeteissa vaan on huippuarvo tietyssä elementin pisteessä. Erityisesti v-magneettien tapauksessa demagnetoituminen näyttäisi käyrän perusteella ilmeiseltä. Minimiarvo osuu kuitenkin magneettien kulmiin ilmevälin puolella, missä ankkurikentän vaikutus on suurimmillaan. Staattori näkee magneetin ilmevälinä ja näin ollen vastamagnetoiva kenttä oikaisee v-magneeteissa kulman läpi, mikä johtaa kulman demagnetoitumiseen. Alue on erittäin pieni suhteessa magneettitilavuuteen ja näin ollen tilanne ei ole niin paha kuin käyrä antaisi ymmärtää. Tilanteesta saattaa jopa olla etua siten, että demagnetoituneet osat suojaavat magneetteja ja näin ollen muut osat eivät altistu yhtä suurille demagnetoivien voimien rasituksille.

Laskennassa kävi ilmi myös se, että pysty- ja v-magneettien tapauksissa alue, jossa minimivuontiheys vallitsee ei muutu napakulman funktiona. Se sijaitsee terävien kulmien kärjissä, joista ankkurikenttä oikaisee yli. Sen sijaan pintamagneeteilla siirtyy minimivuontiheyden huippuarvon paikka magneettien reunoista navan keskilinjaa kohti kulkien pintakerrosta pitkin muutaman millimetrin syvyydellä. Keskipisteen se saavuttaa napakulman arvolla noin 180° , joka tässä suhteessa vastaa myös oikosulkutilannetta.

Verrattaessa pinta- ja pystymagnetointia keskenään havaitaan etu, joka saavutetaan sijoitettaessa magneetit roottorisylinterin sisälle. Pystymagneettien minimivuontiheys on alhaisimmillaankin vain noin -0,14 T kun pintamagneettien tapauksessa minimi on noin -0,5 T. Luvuilla ei tosin ole enää käytännön merkitystä, koska napakulmilla, joilla kyseiset arvot saavutetaan, on moottori jo pudonnut tahdist. Tilanne simuloi kuitenkin tietyin osin oikosulkua, jota tarkastellaan perusteellisemmin kappaleessa 6.5.4.

Nimellistoimintapisteen saavuttamiseksi oli magneettitilavuutta kasvatettava sekä pysty- että v-magnetoinnin osalta. Alhaisemmalla tilavuudella saavutetaan toki vaadittu akseliteho mutta tehokerroin jää auttamatta liian heikoksi. Taulukossa 3 on esitetty nimellispisteiden vertailu eri roottorigeometrioilla.

Taulukko 3. Vertailu vakiostaattorilla nimellispisteessä.

	Pinta-,	Pysty-,	V-magnetointi
$\cos \varphi$	0,950 ind.	0,951 ind.	0,951 ind.
Akseliteho / kW	20520	20077	20019
Napakulma / °	33,1	48,5	68,3
Magneettien tilavuus / m ³	0,5960	0,7719	0,6858
B_{PMmin} / T	0,314	0,271	-0,540
x_d (pu)	0,619	0,996	1,255
x_q (pu)	0,559	0,867	1,469
Staattorin vaiheen hajareaktanssi x_1 (pu)	0,219	0,219	0,219
Napakulma (T_{max})	90,0	88,8	95,9
Staattorivirta / A	4167	4054	4186
T_{max} / T_N	1,72	1,32	1,23
Ilmavälivuontiheys / T	0,94	0,95	0,95
Virrantiheys St. / A/mm ²	4,86	4,73	4,88
Hyötysuhde	0,980	0,981	0,980
Kokonaishäviöt / kW	407,8	384,6	410,0

Taulukon perusteella voidaan tehdä seuraavia huomioita. Toimintapisteessä minimivuontiheydet pinta- ja pystymagnetoinnissa ovat lähes samaa suuruusluokkaa ja demagnetoitumisen vaaraa ei ole. Sen sijaa v-magnetoinnissa minimivuontiheys magneettien kulmissa on suuri ja johtaa taatusti kulmien demagnetoitumiseen. Suurin magneettitilavuustarve on taulukon 3 perusteella pystymagnetoinnissa. On kuitenkin huomattava, että v-magneettien tapauksessa napakulma nousee valitulla mitoituksella nimellispisteessä suureksi ja huippumomentti on vaatimuksiin nähden riittämätön, vain 22,7 % nimellistä suurempi. Lisäksi tällä geometrialla kokonaishäviöt ovat suurimmat. Pystymagnetoinnissa huippumomentin suuruus on 31,6 % ja

pintamagnetoinnissa jopa 71,8 % nimellistä suurempi, joten asetetut kriteerit näiltä osin täyttyvät. Sähkömagneettisen hyötysuhteen osalta kaikki roottorigeometriat pysyvät asetetun raja-arvon yläpuolella. Pintamagnetoinnissa ilmaväli on magneettisesti tasainen magneettien permeabiliteetin ollessa lähellä yhtä. Pitkittäinen ja poikittainen tahtireaktanssi ovat lähes yhtä suuria, joten reluktanssimomenttia ei ole ja kone käyttäytyy umpinapakoneen tavoin. Lisäksi pitkittäinen tahtireaktanssi X_d on merkittävästi pienempi kuin pysty- ja v-magnetoinnissa, mikä johtaa toimintapisteen saavuttamiseen huomattavasti alhaisemmalla napakulmalla yhtälön 6.2 mukaisesti. V-magnetoinnissa poikittainen tahtireaktanssi X_q on sen sijaan pitkittäistä X_d suurempi, mikä johtaa reluktanssimomentin muodostumiseen ja samalla huippumomentin siirtymiseen suuremmalla napakulmalla kuin 90° . Pystymagnetoinnissa tilanne on päinvastainen pitkittäisen tahtireaktanssin ollessa poikittaista suurempi. Reluktanssimomentin syntymisen lisäksi huomion arvoista on huippumomentin siirtyminen kyseisessä tilanteessa hieman 90° pienemmälle napakulmalla.

V-magnetoidulla moottorilla ei huippumomenttia saatu riittävästi ja napakulma nousi reilusti asetetun rajan yläpuolelle. Tämän johdosta tehtiin mitoitus tälle geometrialle uudestaan. Taulukon 4 ensimmäisessä sarakkeessa on esitetty tulokset laskennalle, jossa vyyhdenleveyttä kavennettiin urajaon verran ja samalla magneettien dimensioita optimoitiin. Menettelyllä saatiin huippumomenttia kasvatettua hyväksyttävälle tasolle, 30,2 % nimellistä suuremmaksi. Samalla nimellispiste saatiin siirrettyä hieman alhaisemmalle napakulmalle, mutta vieläkin ollaan reilusti asetetun vaatimuksen yläpuolella. Lisäksi haittapuolena voidaan pitää vyyhdenleveyden kaventumisen johdosta aiheutuvaa vuontiheyksien nousua ja täten rautahäviöiden kasvua, mikä johtaa kokonaishäviöiden kasvuun ja sähkömagneettisen hyötysuhteen laskemiseen raja-arvon 0,980 alapuolelle.

Sarakkeessa 2 on napakulmaa pienennetty vähentämällä staattorikäätymisen tehollisia kierroksia, jolloin vuontiheydet kasvavat. Samalla kasvatettiin magnetointia taulukon 4 mukaisesti. Menettelyllä huippumomentti vaatimus ylitettiin selkeästi sen ollessa yli 70 % nimellistä suurempi. Toimenpiteellä saatiin lisäksi magneettien keskimääräinen vuontiheys nimellispisteessä lähemmäksi puolta remenanssivuontiheyden arvosta, jolloin energiatiheys saavuttaa maksimiarvonsa. Pidettäessä uramitat vakioina ja vähennettäessä tehollisia kierroksia voitiin samalla kasvattaa kuparin poikkipintaa, jolloin virrantiheys pienenee merkittävästi taulukon 4

mukaisesti. Tämä johti staattorin kuparihäviöiden huomattavasti suurempaan putoamiseen suhteessa vuontiheyksien kasvusta seuraavaan rautahäviöiden nousuun, mikä havaitaan kokonaishäviöiden 25 % suuruisena pienenemisenä sekä hyötysuhteen paranemisena arvoon 0,985. Kalliin kestopagneettimateriaalin tarve kasvoi kuitenkin lähes 1,5-kertaiseksi, mikä optimoitaessa kustannuksia ei ole enää järkevää.

Kolmas vaihtoehto huippumomentin kasvattamiselle olisi ollut ilmavälin suurentaminen mutta tässä vaiheessa se pyrittiin pitämään vielä kaikille geometrioille vakiona vertailun helpottamiseksi.

Taulukko 4. Nimellispiste v-magnetoinnilla muokatulla staattorilla.
Ensimmäisessä sarakkeessa on tulokset kavennetulla vyyhdenleveydellä ja toisessa vähennetyllä tehollisten kierrosten lukumäärällä.

	1	2
$\cos \varphi$	0,951 ind.	0,952 ind.
Akseliteho / kW	20051	20001
Napakulma / °	63,9	43,7
Magneettien tilavuus / m ³	0,7753	0,9815
B_{PMmin} / T	-0,48	-0,47
x_d (pu)	1,178	0,866
x_q (pu)	1,148	0,766
x_l (pu)	0,217	0,141
Staattorivirta / A	4211	4060
T_{max} / T_N	1,30	1,70
Ilmaväli vuontiheys / T	1,00	1,23
Virrantiheys St. / A/mm ²	4,91	3,65
Hyötysuhde	0,979	0,985
Kokonaishäviöt / kW	418,3	306,3

Ensitarkastelun perusteella karsittiin epäsovivin roottorigeometria, joten jatkotarkasteluun valittiin edellä esitetyn perusteella pinta- ja pystymagnetointi.

6.5 Jatkotarkastelu

Jatkotarkastelun ensimmäisenä tavoitteena oli tutkia napapariluvun kasvattamisen vaikutusta valituilla geometrioilla. Lisäksi tarkasteltiin häviöitä ja niiden jakautumista tarkemmin. Muutosilmiöistä keskityttiin 2- ja 3-vaiheiseen oikosulkuun huomion erityisesti kohdistuessa kestopagneettien demagnetoitumisen välttämiseen. Vääntömomentin käyrämuotoa tarkasteltiin nimellispisteessä sekä yliaaltosisältö laskettiin tahtikoneen tyhjäkäyntijännitteelle.

6.5.1 Staattorin mitoitus uudelle napaluvulle

Kasvatettaessa napalukua joudutaan myös staattori tietyin osin suunnittelemaan uudestaan. Tässä tapauksessa uraluku $Q_1 = 216$ pidettiin vakiona, jolloin pysyttäessä edelleen kokovakokäämityksessä saatiin vakoluvulla $q_1 = 2$ napapariluvuksi $p = 18$. Vyyhdenleveydeksi valittiin napajako urajakoina -1, kuten napapariluvun $p = 12$ tapauksessakin, joten käämitykselle saatiin 5/6-jänteistys. Vyyhdenleveyden kaventuessa vuontiheydet ilmapälissä, hampaissa ja staattoriselässä pyrkivät kasvamaan saman staattorijännitteen ylläpitämiseksi. Tämän johdosta tehollisten johdinkierrosten lukumäärää oli kasvatettava arvosta 10 tai rinnakkaisten haarojen lukumäärää vähennettävä arvosta 18 hyväksyttävien vuontiheyksien saavuttamiseksi. Tarvittava muutos on noin 60 % suuruusluokkaa ja koska lähimmät sallitut rinnakkaisten haarojen lukumäärät ovat 6 ja 12 jäi ainoaksi vaihtoehdoksi tehollisten johdinkierrosten lukumäärän kasvattaminen 16:een. Pidettäessä uramitat vakioina oli kuparin paksuutta ohennettava tällöin noin 36 %.

6.5.2 Laskentatulokset

Oheiseen taulukkoon 5 on koottu tulokset nimellispisteessä sekä pinta- että pystymagnetoinnille kasvatetulla napapariluvulla. Tuloksista havaitaan kokonaishäviöiden kasvu ja hyötysuhteen laskeminen ennalta määrätyn kriteerin 0,980 alapuolelle.

Taulukko 5. Vertailu nimellispisteessä vakio uramitoilla ja napapariluvulla $p = 18$.

	Pintamagnetointi	Pystymagnetointi
$\cos \varphi$	0,951 ind.	0,950 ind.
Akseliteho / kW	20121	20063
Napakulma / °	35,7	51,1
Magneettien tilavuus / m ³	0,5395	0,6168
B_{PMmin} / T	0,387	0,210
x_d (pu)	0,606	1,013
x_q (pu)	0,668	0,932
x_l (pu)	0,349	0,349
Staattorivirta / A	4018	4048
Ilmavälivuontiheys / T	0,896	0,903
Virrantiheys St. / A/mm ²	4,82	4,86
Hyötysuhde	0,9789	0,9788
Kokonaishäviöt / kW	422,7	424,0

Kokonaishäviöiden pienentäminen on tässä tapauksessa mahdollista ainoastaan staattorikäämitystä optimoimalla, kun roottorigeometriat pidetään vakioina. Staattorin resistiivisten häviöiden pienentämiseksi uran mittoja muokattiin siten, että leveys pidettiin edelleen vakiona mutta uran korkeutta kasvatettiin noin 10 %. Tämän suuruinen muutos voidaan toteuttaa vielä varsin huoletta mekaanisen lujuuden siitä liikaa kärsimättä. Kuparin poikkipintaa saatiin näin riittävästi kasvatettua virrantiheyksien pienentämiseksi. Menettely on täysin perusteltua napaluvun kasvaessa, koska staattorin selän paksuutta voidaan tällöin ohentaa. Lujuuslaskelmien salliessa on jopa mahdollista siirtyä kyseisellä napaluvulla hieman suurempaan ilmavälihalkaisijaan.

Oheisessa taulukossa 6 on esitetty tulokset kasvatetulla staattorin uran korkeudella pinta- ja pystymagnetoidulle moottorille nimellispisteessä.

Taulukko 6. Vertailu nimellispisteessä kasvatetulla staattorin uran korkeudella ja napapariluvulla $p = 18$.

	Pintamagnetointi	Pystymagnetointi
$\cos \varphi$	0,950 ind.	0,951 ind.
Akseliteho / kW	20019	20078
Napakulma / °	36,2	51,6
Magneettien tilavuus / m ³	0,5623	0,6352
B_{PMmin} / T	0,4018	0,2189
x_d (pu)	0,678	1,025
x_q (pu)	0,615	0,944
x_l (pu)	0,371	0,371
Staattorivirta / A	3992	4039
T_{max} / T_N	1,58	1,26
Ilmavälivuontiheys / T	0,899	0,908
Virrantiheys St. / A/mm ²	4,31	4,36
Hyötysuhde	0,9805	0,9804
Kokonaishäviöt / kW	389,3	392,5

Kuten taulukosta havaitaan on kokonaishäviöt saatu menettelyllä laskettua samalle tasolle kuin napapariluvun $p = 12$ tilanteessa ja pintamagnetoinnin tapauksessa jopa hieman alle. Samalla hyötysuhteet ovat parantuneet vaaditulle tasolle. Kasvatettaessa uran korkeutta pienenee kuitenkin staattorin rautatilavuus, mikä heijastuu lisämagnetoinnin tarpeena roottorin puolelta taulukoiden 5 ja 6 mukaisesti.

Verrattaessa taulukon 6 tuloksia napapariluvun $p = 12$ tapaukseen taulukossa 3 voidaan selkeästi todeta napapariluvun kasvattamisen positiivinen vaikutus kalliiseen kestomagneettimateriaalin tarpeeseen. Pintamagnetoinnin tapauksessa tilavuus on laskenut noin 5,6 % kun taas pystymagnetoinnissa vaikutus on suurempi ja vastaava luku on noin 17,7 %. Magneettitilavuuden pienentyessä roottorin tuottama magnetomotorinen voima heikkenee, mikä johtaa nimellispisteen siirtymiseen hieman suuremmalle napakulman arvolle. Samalla huippumomentti pienenee. Pintamagnetoidulla versiolla muutokset pysyvät sallituissa rajoissa. Sen sijaan pystymagnetoidulla moottorilla huippumomentti on riittämätön, enää 25,7 % nimellistä suurempi. Vastaava luku pintamagnetoidulla moottorilla on 57,6 %.

6.5.3 Häviövertailu

Oheisiin taulukoihin 7 ja 8 on koottu tarkempi erittely häviöistä ja niiden jakautumisesta pinta- ja pystymagnetoinneilla napapariluvuilla $p = 12$ ja $p = 18$. Laskennat tehtiin aikaisemmasta poiketen 2. asteen elementeillä, laskemalla 3 jaksoa

kokonaisaskelmäärällä 1200. Tämä siksi, että lämpöverkkolaskuja silmällä pitäen haluttiin mahdollisimman tarkkoja tuloksia. Siirryttäessä laskennassa lineaarisista elementeistä parabolisiin kasvaa laskenta-aika merkittävästi. Sähkömagneettisten tulosten kannalta muutos heijastuu nimellispisteessä lähinnä napakulmaan ja magnetoinnin tarpeeseen. Pystymagnetoidussa versiossa roottorin magnetointia oli tarpeen kasvattaa hieman pintamagnetoitua moottoria enemmän.

Häviölaskennan tarkentuminen perustuu muun muassa urayliaaltojen synnyttämien häviöiden tarkentumiseen, mitkä sijaitsevat todellisuudessa ohuessa pintakerroksessa. 1. asteen elementeillä laskettaessa on vuontiheys elementin sisällä vakio ja yliaaltojen vaikutus saattaa korostua liikaa, koska häviöt vallitsevat elementtien johdosta todellisuutta huomattavasti syvemmissä kerroksessa. 2. asteen elementeillä vuontiheys vaihtuu myös elementin sisällä ja näin ollen tulokset vastaavat paremmin todellisuutta.

Taulukoiden 1. sarakkeessa on esitetty tulokset napapariluvulle $p = 12$. 2. sarakkeeseen on kirjattu tulokset napapariluvulle $p = 18$, kun staattorin uran korkeus on napapariluvun $p = 12$ mukainen. Viimeisessä sarakkeessa on tulokset napapariluvulle $p = 18$, kun staattorin uran korkeutta on kasvatettu noin 10 %.

Taulukko 7. Häviöt pintamagnetoinnissa napapariluvuilla $p = 12$ ja $p = 18$.

Häviöt	1	2	3
Staattorin resistiiviset häviöt / kW	330,1	355,9	323,2
Staattorin rautahäviöt / kW	47,0	58,4	62,7
Staattorin kokonaishäviöt / kW	377,1	414,3	385,8
Häviöt kestoplaneeteissa / kW	14,5	11,1	11,1
Roottorin rautahäviöt / W	7,3	0,3	0,2
Roottorin kokonaishäviöt / kW	14,8	11,1	11,1
Kokonaishäviöt / kW	391,9	425,4	397,0

Taulukko 8. Häviöt pystymagnetoinnissa napapariluvuilla $p = 12$ ja $p = 18$.

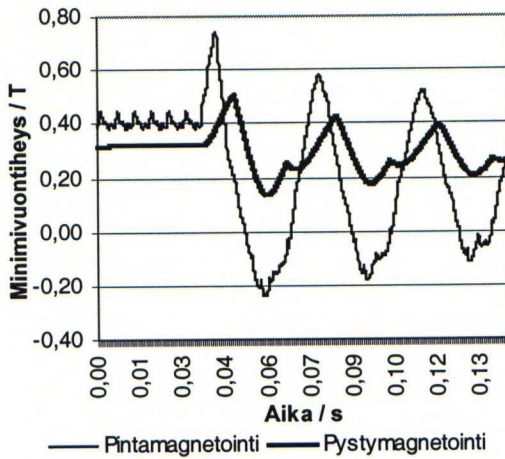
Häviöt	1	2	3
Staattorin resistiiviset häviöt / kW	322,5	349,2	313,2
Staattorin rautahäviöt / kW	45,6	56,3	60,5
Staattorin kokonaishäviöt / kW	368,1	405,5	373,7
Häviöt kestoplaneeteissa / W	2,5	0,2	0,2
Roottorin rautahäviöt / kW	9,9	9,4	9,5
Roottorin kokonaishäviöt / kW	10,8	9,8	9,9
Kokonaishäviöt / kW	378,8	415,3	383,6

Napapariluvun kasvattaminen johtaa tulosten perusteella selkeään staattorin rautahäviöiden kasvuun, johon syynä on syöttötaajuuden nousu. Kasvatettaessa uran korkeutta joudutaan tinkimään raudan määrästä staattorin tilavuuden pysyessä vakiona. Tämä johtaa selän vuontiheyksien kasvuun ja täten edelleen lievään rautahäviöiden nousuun. Toisaalta virrantiheydet pienenevät aiheuttaen resistiivisten häviöiden huomattavasti voimakkaamman laskun, mikä johtaa staattorin kokonaishäviöiden alenemiseen lähes samalle tasolle kuin napapariluvun $p = 12$ tapauksessa. Pintamagnetoinnissa roottorin kokonaishäviöt muodostuvat pääosin kestormagneetteihin indusoituvista pyörrevirtahäviöistä, kun taas pystymagnetoinnilla pääasiassa roottorin rautahäviöistä. Näin ollen magneetit ovat huomattavasti paremmin suojattuina, kun ne sijoitetaan roottorin sisälle. Kokonaishäviöiden kannalta paras tulos saavutetaan pystymagnetoinnilla napapariluvulla $p = 12$.

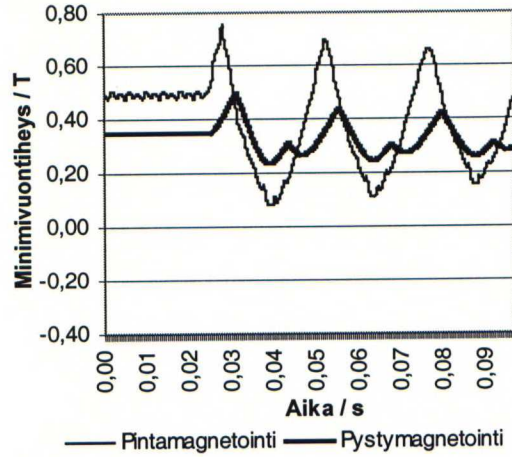
6.5.4 2- ja 3-vaiheinen oikosulku

Kestomagneettien demagnetoitumisen kannalta ovat 2- ja 3-vaiheiset oikosulkutilanteet muutosilmiöistä ehdottomasti vaarallisimpia. Magneettien vuontiheyden heilahtelu ensimmäisten jaksojen aikana saattaa laskea tasolle, joka aiheuttaa magneettien osien demagnetoitumista. On kuitenkin huomattava, että lasketut arvot eivät vallitse kauttaaltaan magneeteissa vaan ovat tietyn pisteen huippuarvoja. Näin ollen vaikka demagnetoitumista tapahtuisikin koskisi se vain tiettyä aluetta magneetissa, mikä saattaa olla hyvinkin pieni.

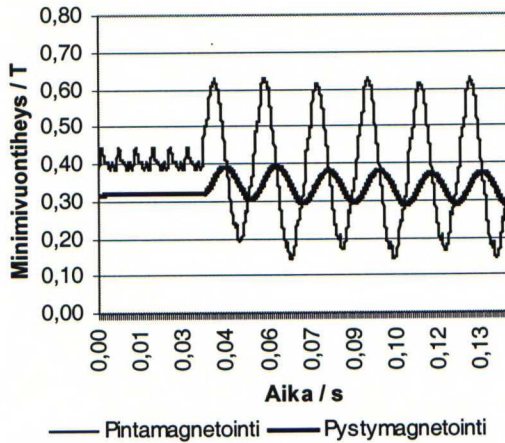
2- ja 3-vaiheista oikosulkua simuloitiin aika-askelmenetelmällä 2. asteen elementeillä. Oikosulkuilmiölle on luonteenomaista se, että pahin tilanne toteutuu ensimmäisten jaksojen aikana. Tämän johdosta 4 ensimmäistä jaksoa laskettiin kokonaisaskelmäärällä 1600. FEM-ohjelma suorittaa oletuksena muutostilan aika-askel laskennan siten, että ensin lasketaan 1 jakso nimellistä tilannetta, jonka jälkeen synnytetään oikosulkutilanne. 3-vaiheisen oikosulun tapauksessa muutostilan syntymishetkellä ei ole tuloksiin merkitystä, koska keskiarvoisesti tilanne on vaiheiden osalta aina vakio. Sen sijaan 2-vaiheisessa oikosulussa muutostilan alkuhetkellä on vaikutusta tuloksiin ja pahin tilanne saattaa syntyä eri hetkellä kuin ohjelman käyttämällä arvolla. Tämä on huomioitava seuraavissa kuvien 12 ja 14 2-vaiheisen oikosulun tuloksissa, joissa on siis mahdollista että tietyllä ajanhetkellä vuontiheydet laskevat esitettyjä arvoja alemmaksi. Napapariluvun $p = 18$ laskennassa käytettiin versiota, jossa staattorin uran korkeutta oli kasvatettu.



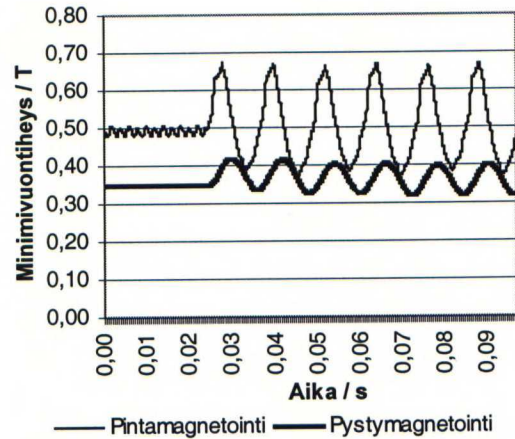
**Kuva 11. Kestomagneettien
minimivuontiheys 3-vaiheisessa
oikosulussa napapariluvulla $p = 12$.**



**Kuva 13. Kestomagneettien
minimivuontiheys 3-vaiheisessa
oikosulussa napapariluvulla $p = 18$.**



**Kuva 12. Kestomagneettien
minimivuontiheys 2-vaiheisessa
oikosulussa napapariluvulla $p = 12$.**



**Kuva 14. Kestomagneettien
minimivuontiheys 2-vaiheisessa
oikosulussa napapariluvulla $p = 18$.**

Käytetyllä magneettimateriaalilla 120 °C lämpötilassa on polvipiste noin 0,05 T. Kuvien 11 - 14 perusteella demagnetoitumista tapahtuu varmasti napapariluvulla $p = 12$ käytettäessä pintamagnetointia, jolloin 3-vaiheisessa oikosulussa minimivuontiheys kestopagneeteissa laskee arvoon -0,24 T. Tilannetta saadaan hieman parannettua siirtymällä napaparilukuun $p = 18$, jolloin vastaava arvo nousee 0,078 Teslaan. Syynä tähän on suuremmat muutostilojen reaktanssit napapariluvulla $p = 18$ ja pienentyneen vakoluvun johdosta heikompi vastamagnetoiva kenttä. Marginaali demagnetoitumiseen jää kuitenkin auttamatta liian pieneksi. Pystymagnetoinnissa napapariluvun kasvattamisen vaikutus ei ole yhtä merkittävä ja

se heijastuukin lähinnä lievään vuontiheyden heilahtelun vaimenemiseen. Lasketuissa muutostiloissa ei pystymagnetoiduilla versioilla tapahdu demagnetoitumista vuontiheyden alimman arvon ollessa 0,14 T, joka saavutetaan 3-vaiheisessa oikosulussa napapariluvulla $p = 12$. Verrattaessa 2- ja 3-vaiheista oikosulkua keskenään voidaan havaita, että lasketuissa tapauksissa jälkimmäinen on kestopagneettien demagnetoitumisen kannalta vaarallisempi.

6.5.5 Vääntömomentti nimellispisteessä ja tyhjäkäyntijännitteen yliaaltosisältö

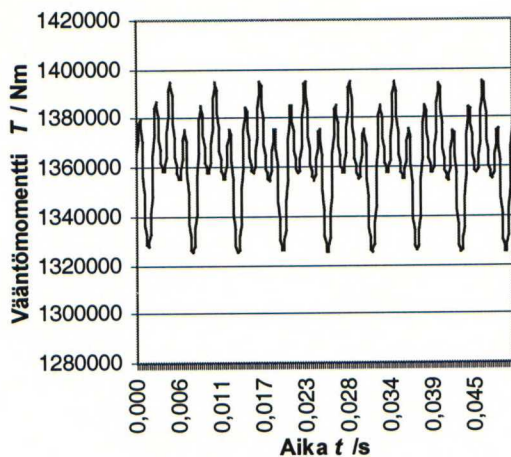
Seuraavaksi tutkittiin vääntömomentin käyrämuotoa nimellispisteessä. Laskenta suoritettiin aika-askelmenetelmällä 2. asteen elementeillä. Vääntömomentin ominaisuudet vaikuttavat ensisijaisesti laivan värinäominaisuuksiin ja tästä syystä momentin käyrämuodon tulisi olla mahdollisimman tasainen. Moottorin vääntömomentti nimellispisteessä pinta- ja pystymagnetoiduilla roottoreilla napapariluvun ollessa $p = 12$ ja $p = 18$ on esitetty kuvissa 15 - 18. Kuvien perusteella huonolaatuaisin momentti näyttäisi olevan pintamagnetoidulla versiolla napapariluvun p ollessa 12. Mikäli tätä versiota halutaan hyödyntää, tulisi magneettien pinta-asennuksessa käyttää siirtoa, jolloin muun muassa urayliaaltojen vaikutusta saadaan pienennettyä.

Seuraavaan taulukkoon on kirjattu 5 suurinta yliaaltoa ja niiden amplitudit suhteessa nimelliseen vääntömomenttiin prosentteina esitettynä perusaallon ollessa yhden verkkojakson mittainen.

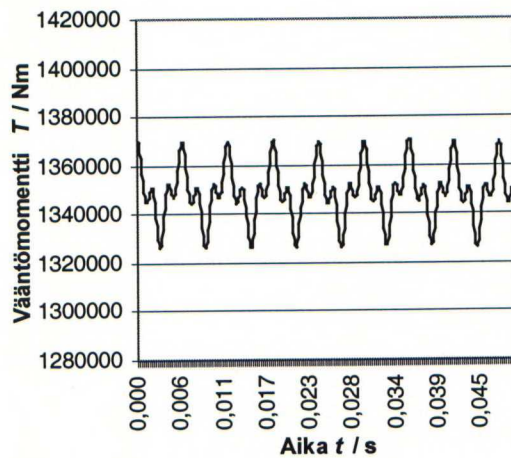
Taulukko 9. Tahtimoottorin vääntömomentin viiden suurimman yliaallon amplitudin suhde nimelliseen vääntömomenttiin prosentteina esitettynä.

Pinta, $p = 12$		Pysty, $p = 12$		Pinta, $p = 18$		Pysty, $p = 18$	
18.	1,39 %	6.	0,96 %	12.	1,44 %	12.	1,91 %
6.	1,19 %	18.	0,63 %	6.	0,14 %	6.	0,30 %
12.	0,45 %	24.	0,03 %	24.	0,07 %	4.	0,06 %
36.	0,22 %	2.	0,02 %	4.	0,03 %	24.	0,02 %
24.	0,02 %	12.	0,02 %	18.	0,03 %	18	0,02 %

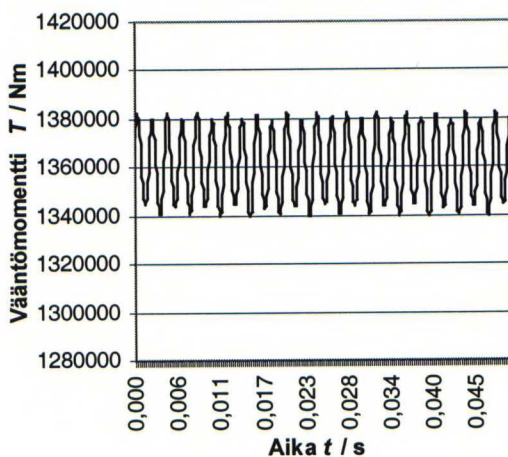
Taulukosta havaitaan, että napapariluvulla $p = 12$ ovat 6. ja 18. yliaalto vallitsevia kun taas napapariluvun $p = 18$ tapauksessa 12. yliaalto. Suurin amplitudi syntyy napapariluvun $p = 18$ pystymagnetoidulla moottorilla uraharmonisella yliaallolla 12.



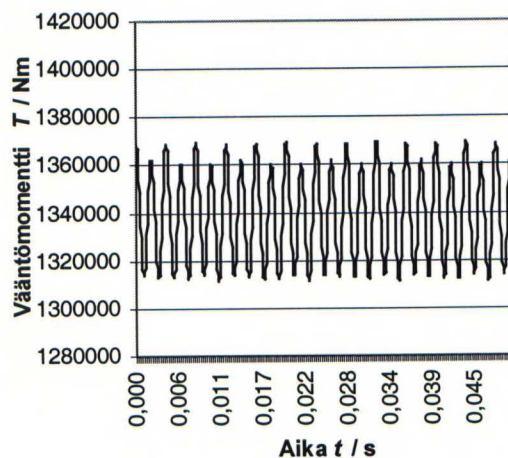
**Kuva 15. Pintamagnetoidun
moottorin vääntömomentti
napapariluvulla $p = 12$.**



**Kuva 17. Pystymagnetoidun
moottorin vääntömomentti
napapariluvulla $p = 12$.**



**Kuva 16. Pintamagnetoidun
moottorin vääntömomentti
napapariluvulla $p = 18$.**



**Kuva 18. Pystymagnetoidun
moottorin vääntömomentti
napapariluvulla $p = 18$.**

Seuraavaksi laskettiin tyhjäkäyntijännitteen yliaaltosisältö ja puhelintaajuisia yliaaltoja painottava särökerroin THF, jonka tämän suuruusluokan tahtikoneilla tulisi alittaa arvo 1,5 % standardin IEC 60034-1 mukaisesti.

Tulokset on esitetty seuraavassa taulukossa 10. Kuten havaitaan, pystymagnetoitua napapariluvun $p = 12$ versiota lukuun ottamatta pysytään sallituissa rajoissa. Siirtymällä kokovakokäämityksestä murtovakoon saataisiin uraharmonisia yliaaltoja pienenettyä ja täten myös särökerrointa.

Taulukko 10. Tyhjäkäyntijännitteen särökerroin THF.

	THF
Pintamagnetoitu moottori, $p = 12$	1,1
Pintamagnetoitu moottori, $p = 18$ (Kasvatetulla uran korkeudella)	1,4
Pystymagnetoitu moottori, $p = 12$	2,5
Pystymagnetoitu moottori, $p = 18$ (Kasvatetulla uran korkeudella)	1,5

6.5.6 Roottorigeometrian valinta

Jäähdytysratkaisun kannalta on edellä lasketuista tapauksista paras roottorigeometria ehdottomasti taulukon 4 mukainen v-magnetointi, jolla sähkömagneettinen hyötysuhde on 0,985. Kyseisellä geometrialla kestomagneettitilavuus kasvaa kuitenkin suureksi ja näin ollen sen hyödyntäminen ei ole järkevää. Käytetyllä magneettimateriaalilla täyttää napapariluvun $p = 12$ pystymagnetoitu versio parhaiten kappaleessa 6.2 esitetyt suunnitteluvaatimukset. Tällä versiolla on alhaisimmat häviöt ja täten paras sähkömagneettinen hyötysuhde. Kestomagneetit ovat lisäksi hyvin suojassa napalevyjen välissä ja tutkituissa muutostiloissa vuontiheys ei laske demagnetoitumista aiheuttavalle tasolle. Mikäli halutaan käyttää roottorissa pintamagnetointia, on magneeteissa muutostilojen aikana esiintyvien alhaisten vuontiheyksien johdosta siirryttävä sellaisen magneettimateriaalin hyödyntämiseen, joka kestää demagnetoivia voimia paremmin. Tällöin joudutaan yleensä tinkimään magneetin remenassivuontiheyden arvosta, jolloin nimellispisteeseen pääsemiseksi tarvitaan suurempi kestomagneettitilavuus ja näin ollen pinta-asennuksesta saavutettava etu menetetään. Jos taas halutaan säilyttää magneettitilavuus samana, eli käyttää materiaalia, jolla remenanssivuontiheys on likipitään samaa suuruusluokkaa, mutta polvipiste alhaisempi, kasvaa magnetoinnin kustannukset vääjäämättä. Näin ollen pystymagnetointi vaikuttaisi tilanteeseen parhaiten sopivalta ratkaisulta. Ainoana heikkoutena voidaan pitää tyhjäkäyntijännitteen yliaaltosisältöä. Sen

pienentämiseksi sekä nimellispisteen vääntömomentin ominaisuuksien parantamiseksi tarkasteltiin pystymagnetoidulle versiolla vielä murtovakokäämitys. Napapariluvun osalta siirryttiin arvoon $p = 14$, jotta kestopagneettitilavuutta saataisiin hieman pienennettyä. Vakoluvuksi valittiin $q_1 = 2,5$, jolloin uraluvuksi Q_1 saadaan 210.

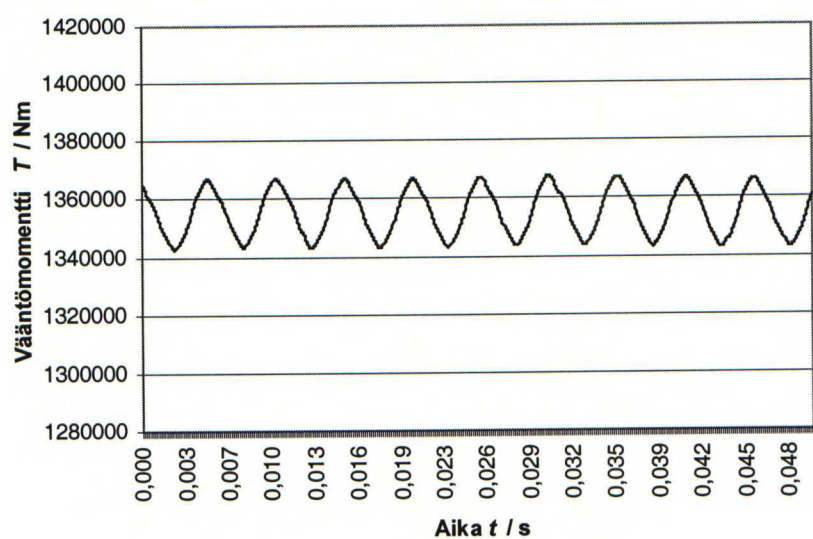
Tarkennettu laskenta pystymagnetoidulle versiolle osoitti, että magneetin leveys/korkeus-suhteella 0,52 tapahtuu suurella kuormituksella ankkurireaktion voimistuessa demagnetoitumista magneetin kulmissa minimivuontiheyden laskiessa reilusti negatiivisen puolelle. Tämän johdosta leveys/korkeus-suhdetta kasvatettiin arvoon 0,86. Magneettien kokonaistilavuus hieman kasvoi, mutta menettelyllä saatiin huippumomentillakin minimivuontiheys magneeteissa pysymään tasolla, joka ei aiheuta demagnetoitumista terävissä kulmissa. Lisäksi huippumomentti saatiin 48 % nimellistä suuremmaksi. Toisen asteen elementeillä lasketut tulokset on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Pystymagnetoitu moottori murtovakokäämityksellä nimellispisteessä.

	Pystymagnetointi, $p = 14, q_1 = 2,5$
$\cos \varphi$	0,950 ind.
Akseliteho / kW	20018
Napakulma / °	46,7
Magneettien tilavuus / m ³	0,7967
x_d (pu)	0,847
x_q (pu)	0,828
x_1 (pu)	0,268
Staattorivirta / A	4066
T_{\max} / T_N	1,48
Ilmavälivuontiheys / T	0,945
Virrantiheys St. / A/mm ²	3,98
Hyötysuhde	0,983
Kokonaishäviöt / kW	338,3
THF	0,51

Käytetyllä staattorin mitoituksella uran leveys kasvaa. Tämä mahdollistaa kuparin leveyden kasvattamisen, mikä johtaa taulukon 11 mukaisesti virrantiheyden putoamiseen vaikkakin tehollisten kierrosten lukumäärää oli sallittujen vuontiheyksien saavuttamiseksi nostettava 20 %. Kokonaishäviöitä saatiin menettelyllä pudotettua noin 11 %, jolla on positiivinen vaikutus jäähdytysratkaisua

silmällä pitäen. Tyhjäkäyntijännitteen yliaaltosisältö saatiin laskettua sallituksi särökertoimen pudotessa arvoon 0,51 %. Roottorin epämagneettisen urakiilan paksuus sekä napalevyn ja magneettien dimensiot mitoitettiin siten, että vuontiheys magneeteissa ei laske 2- tai 3-vaiheisessa oikosulussa demagnetoitumista aiheuttavalle tasolle. Vuontiheyden alin piste kestmagneeteissa 3-vaiheisessa oikosulussa oli 0,24 Teslaa. Tällöin marginaali demagnetoitumista aiheuttavalle tasolle on varmasti riittävä. 2-vaiheisessa oikosulussa muutostilan syntyhetkellä on vaikutusta tuloksiin. Tämän johdosta jaettiin jakso kymmeneen osaan, jolloin pystyttiin tutkimaan muutostilan alkuhetken vaikutusta minimivuontiheyksien arvoihin. Laskelmien perusteella minimivuontiheys kestmagneeteissa oikosulun aikana eri syntyhetkillä vaihteli arvojen 0,26 T - 0,42 T välillä, joten tässä tapauksessa 3-vaiheinen oikosulku on lievästi vaarallisempi. Siirryttäessä murtovakokäämitykseen saatiin nimellispisteen vääntömomentin ominaisuuksia parannettua kuvan 19 ja taulukon 12 mukaisesti.



Kuva 19. Vääntömomentti nimellispisteessä pystymagnetoidulla, murtovaolisella tahtimoottorilla napapariluvulla $p = 14$.

Taulukko 12. Tahtimoottorin vääntömomentin viiden suurimman yliaallon amplitudin suhde nimelliseen vääntömomenttiin prosentteina esitettynä.

Pystymagnetointi, $p = 14$	
6.	0,83 %
12.	0,05 %
30.	0,03 %
18.	0,02 %
24.	0,01 %

Kuvasta 19 havaitaan, että vääntömomentti on huomattavasti tasaisempi ja sen huipusta-huippuun arvo merkittävästi pienempi kuin kuvassa 17 vertailun parhaalla mitoituksella. Lisäksi taulukon 12 tuloksista havaitaan, että 6. yliaalto on edelleen vallitsevin aivan kuten taulukon 9 sarakkeessa 2, mutta siirryttäessä murtovakokäämitykseen on amplitudia saatu pienennettyä. Samalla 18. yliaalto on saatu lähes hävitettyä ja muutkin yliaallot ovat kuudenteen nähden merkityksettömiä toisin kuin taulukon 9 kokovakokäämityksen tapauksessa.

6.5.7 Sähkömagneettinen mitoitus suoraan merivesijäähdytykseen

Mikäli jäähdyttäminen toteutetaan pakotetun ilmankierron sijasta seuraavassa kappaleessa tarkemmin kuvatulla suoralla merivesijäähdytyksellä muuttuu moottorin rakenne hieman radiaalisten jäähdytyssolien poistuttua. Tämä johtaa nimellispisteessä hieman edellä laskettuja arvoja poikkeaviin tuloksiin, minkä takia laskettiin napapariluvun $p = 14$ pystymagnetoidulle versiolle lämpöverkkoa varten tapaus, jossa solia ei ole ja jonka häviöt vastaavat siten paremmin todellisuutta. Solien poistuttua staattorin rautatilavuus kasvaa, mikä johtaa vuontiheyksien laskemiseen. Tämä mahdollistaa uran leveyden kasvattamisen hampaan kustannuksella ilman, että vuontiheydet nousevat solallista versiota korkeammiksi. Menettelyllä tosin menetetään mahdollisuus nimellispisteeseen pääsemiseen huomattavasti alhaisemmalla magneettitulavuudella. Kuparin leveyttä pystytään kuitenkin kasvattamaan noin 12,4 %, mikä johtaa virrantiheyden ja täten resistiivisten häviöiden laskuun. Tämä onkin erittäin tärkeää, koska jäähdytysratkaisu ei ole yhtä tehokas verrattuna pakotettuun ilmankierroon, jolloin myös sähkömagneettisen hyötysuhteen tulee olla parempi. Tulokset on esitetty taulukon 13 sarakkeessa 1.

Taulukossa on esitetty tulokset myös pintamagnetoidulle versiolle sarakkeessa 2. Tällä geometrialla magneettitilavuus saadaan laskettua noin 27 % alhaisemmaksi ja huippumomentti on solatonta pystymagnetoitua versiota noin 17,3 % suurempi. Tällöin on kuitenkin siirryttävä demagnetoivia voimia paremmin kestävän magneettimateriaalin hyödyntämiseen.

Taulukko 13. Vertailu napapariluvulla $p = 14$ nimellispisteessä pysty- ja pintamagnetoidulle jäähdytyssolattomalle versiolle.

	Pystymagnetointi	Pintamagnetointi
Napakulma / °	45,8	32,7
Magneettien tilavuus / m ³	0,7878	0,5788
T_{\max} / T_N	1,50	1,76
Ilmavälivuontiheys / T	0,940	0,935
Virrantiheys St. / A/mm ²	3,53	3,53
Hyötysuhde	0,985	0,984
THF	0,36	0,26
Staattorin resistiiviset häviöt / kW	243,4	244,1
Staattorin rautahäviöt / kW	47,2	50,2
Staattorin kokonaishäviöt / kW	290,6	294,3
Häviöt kestopagneeteissa / W	19	21217
Roottorin rautahäviöt / W	14736	12
Roottorin kokonaishäviöt / kW	17,1	21,6
Kokonaishäviöt / kW	307,7	315,9

7 TERMINEN MITOITUS

Termisen mitoituksen tavoitteena oli tutkia lämpötilojen nousua kriittisillä alueilla ja näin varmistaa että pysytään eristysluokan määäämissä sallituissa rajoissa. Ympäristön lämpötilana käytettiin 32 °C:sta, joten luokan B mukaisesti käämityksen lämpenemä ei saisi laskennassa ylittää 88 °C:sta sivun 22 taulukon 1 mukaisesti.

Pakotettu ilmankierto kappaleen 6.5.6 mukaisella sähkömagneettisella mitoituksella on erittäin tehokas jäähdyttämään yksikköä riittävästi. Sen sijaan suorassa merivesijäähdytyksessä on mahdollista, että lämpötilat nousevat liian korkeiksi ja näin ollen seuraavassa keskitytään tutkimaan lämpenemiä tämän osalta tarkemmin. Tavoitteena on löytää sähkömagneettinen ratkaisu, joka voitaisiin toteuttaa pakotetun ilmankierron sijasta suoralla merivesijäähdytyksellä.

Kun staattorin selkä puristusliitetään podin runkoon kiinni, tulevat radiaaliset jäähdytyssolat tarpeettomiksi ja ne voidaan poistaa. Moottorin jäähtyminen perustuu tämän tyyppisessä ratkaisussa lämmönsiirtymiseen yksikköä ympäröivään meriveteen. Ratkaisu ei ole yhtä tehokas kuin pakotettu ilmankierto mutta sillä saavutetaan tiettyjä etuja. Ensinnäkin yksiköstä vapautuu tilaa lämmönvaihtimien ja kuorisolan poistuttua. Toisaalta jäähdytyssolien poistuttua staattorin rautatilavuus kasvaa pidettäessä moottorin pituus vakiona, jolloin voidaan joko kasvattaa uramittoja ja täten kuparin dimensioita resistiivisten häviöiden pienentämiseksi tai vaihtoehtoisesti saavuttaa nimellispiste alhaisemmalla magneettitulavuudella.

Levysydämen alueella lämmönsiirtymistä voidaan tarkastella symmetrian nojalla yhden urajaon alueella. Tälle alueelle muodostettu lämpöverkko on esitetty liitteessä 1. Lämmönsiirtyminen perustuu lämmönjohtumiseen lämpöresistanssien kuvaamien kerrosten yli ja lopulta meriveden synnyttämään konvektioon. Sen sijaan vyyhdenpääalueella lämmönsiirtyminen perustuu johtumiseen eristekerroksen yli, konvektioon vyyhdenpääpinnoilta ilmaan, ilmatilasta edelleen podin sisäpintaan, johtumiseen podin vaipan yli ja lopulta meriveden synnyttämään konvektioon podin ulkopinnalta. Toisaalta lämpöä siirtyy myös johtumalla kuparia pitkin levysydämeen päin, mikä aiheuttaa sydämen päätyalueiden voimakkaamman lämpenemän keskialueisiin verrattuna.

Termisen mitoituksen kannalta roottorigeometrioiden erona voidaan pitää erityyppistä roottorin lämpenemistä. Pintamagnetoinnissa roottorin häviöt koostuvat

pääosin kestopagneeteissa syntyvistä häviöistä, minkä johdosta roottori ei lämpene tasaisesti. Sen sijaan pystymagnetoinnissa roottorin häviöt ovat lähes kokonaisuudessaan sydämen rautahäviöitä ja näin ollen roottoria voidaankin pitää tasalämpöisenä. Molemmissa tapauksissa häviöt ovat kuitenkin kohtalaisen vähäisiä suhteessa kokonaishäviöihin ja käytännössä roottorin lämpötilan määrää päätyilman lämpötila. Laskennassa roottorihäviöiden synnyttämä lämmittävä vaikutus on sijoitettu staattorin kupariin, joka lämpötilojen kannalta on kriittisin alue.

7.1 Levysydämen alueen lämpöverkko

Alustavia lämpenemiä staattorin levysydämen alueella laskettiin liitteen 1 mukaisella lämpöverkolla, joka käsittää yhden urajaon alueen. Lämpöresistanssit on määritelty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 14. Lämpöresistanssit liitteen 1 lämpöverkossa.

R_{conv}	Konvektiivinen lämpöresistanssi podin pinnasta mereen
R_{podh}	Lämpöresistanssi podin vaipan yli
R_{sf}	Lämpöresistanssi puristusliitoksen yli
R_{yoke}	Lämpöresistanssi staattoriselän yli
R_{ins1}	Lämpöresistanssi uraeristeen yli uran pohjalla
R_{ins2}	Lämpöresistanssi uraeristeen yli uran sivuilla
R_{ins3}	Lämpöresistanssi vyyhtien välissä olevan eristeen yli
R_d	Lämpöresistanssi puolikkaan hampaan yli

Lämpöresistanssien laskemiseksi on tunnettava fysikaalisten mittojen lisäksi lämmönjohtavuudet ja lämmönsiirtymiskertoimet. Lausekkeet levysydämen lämpöverkon resistanssien määrittämiseksi on esitetty liitteessä 2. Konvektiivisten lämmönsiirtymiskertoimien suuruus sähkökoneen eri osissa riippuu voimakkaasti vallitsevista paikallisista oloista. Näin ollen niiden tarkka määrittäminen on vaikeaa ja kirjallisuudesta löytyykin monia hieman eri tuloksia antavia arvioita. Työssä käytetään seuraavia arvoja lämmönjohtavuuksille ja lämmönsiirtymiskertoimille.

Puristusliitoksen lämmönjohtavuus	0,5 W/mK
Podin vaipan lämmönjohtavuus	59 W/mK
Levysydämen radiaalinen lämmönjohtavuus	30 W/mK
Levysydämen aksiaalinen lämmönjohtavuus	0,2 W/mK
Kuparin lämmönjohtavuus	393 W/mK
Uraeristeen lämmönjohtavuus	0,25 W/mK
Lämmönsiirtymiskerroin podin ulkopinnalta meriveteen	1800 W/m ² K

Lämmönsiirtymiskerroin vyyhdenpääpinnalta ilmatilaan	40 W/m ² K
Lämmönsiirtymiskerroin levysydämen päädyistä ilmatilaan	40 W/m ² K
Lämmönsiirtymiskerroin ilmatilasta podin sisäpintaan	40 W/m ² K

Liitteen 1 lämpöverkkoon kuuluu yhteensä 6 solmupistettä, jotka sijaitsevat staattoriselässä (1), uran pohjalla (2), staattorivyyhtien keskipisteissä (4) & (6) ja hampaiden alueella (3) & (5). Lämpenemien laskemiseksi sähkömagneettisessa mitoituksessa lasketut häviöt sijoitetaan urajakoa kohti jaettuina lämpöverkkoon virtalähteiksi. Tämä toteutetaan siten, että staattorin kuparihäviöt, vyyhdenpäissä syntyviä häviöitä lukuun ottamatta, ja roottorin häviöt kohdistetaan solmupisteisiin (4) & (6), rautahäviöt hampaissa solmuihin (3) & (5) sekä staattorin rautahäviöt levysydämen alueella pisteeseen (1). Lämpöverkko ratkaistaan solmumenetelmällä, jolloin verkon yhtälöksi matriisimuodossa saadaan:

$G_{10}+G_{12}$	$-G_{12}$	0	0	0	0	U_1	I_{yoke}
$-G_{12}$	$G_{12}+G_{23}+G_{24}+G_{25}$	$-G_{23}$	$-G_{24}$	$-G_{25}$	0	U_2	0
0	$-G_{23}$	$G_{23}+G_{34}+G_{36}$	$-G_{34}$	0	$-G_{36}$	U_3	I_{teeth}
0	$-G_{24}$	$-G_{34}$	$G_{24}+G_{45}+G_{46}+G_{34}$	$-G_{45}$	$-G_{46}$	U_4	I_{cu}
0	$-G_{25}$	0	$-G_{45}$	$G_{25}+G_{45}+G_{56}$	$-G_{56}$	U_5	I_{teeth}
0	0	$-G_{36}$	$-G_{46}$	$-G_{56}$	$G_{56}+G_{46}+G_{36}$	U_6	I_{cu}

Ratkaisemalla nyt matriisiyhtälöstä vektori $[U_1...U_6]$ saadaan selville lämpenemät tarkasteltavissa solmupisteissä.

7.2 Laskentatulokset levysydämen alueella

Lähtökohtana termiselle mitoitukselle käytettiin kappaleessa 6.5.7 laskettua pystymagnetoitua, jäähdytyssolatonta, napapariluvun $p = 14$ tahtimoottoria, jonka häviöt on esitetty taulukossa 13.

Lämpöverkon antamat tulokset lämpenemistä levysydämen alueella on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 15. Lämpenemät levysydämen alueella.

	$\Delta T / ^\circ C$
Lämpenemä levysydämessä	48,2
Lämpenemä uran pohjalla	68,2
Lämpenemä hampaan keskellä	95,1
Lämpenemä ylemmässä vyyhdessä	98,3
Lämpenemä ilmapölinpuoleisessa vyyhdessä	117,2

Suunniteltaessa tahtimoottori eristysluokan B mukaiseksi on sallittu käämityksen lämpenemä 88 °C. Taulukon 15 tuloksista havaitaan että, lämpenemät nousevat jo

levysydämenkin alueella aivan liian suuriksi. Kun vielä huomioidaan vyyhdenpäiden merkittävästi voimakkaampi lämpenemä, on rajojen ylitys huomattava.

Liiallisen lämpenemän johdosta oli valitun tahtimoottorin staattoria hieman muokattava häviöiden pienentämiseksi. Staattorin kuparin paksuutta kasvatettiin 10%, jolloin uran korkeus kasvoi noin 9 %. Uran korkeuden kasvattaminen pienentää staattorin rautatilavuutta ja kasvattaa vuontiheyksiä staattorin selässä. Tämä heijastuu roottorissa lievään (noin 2 %) magnetointitarpeen kasvuun sekä toisaalta staattorin rautahäviöiden nousuun. Uudeksi uran ja selän korkeuksien suhteeksi saatiin 1,09 eli uran korkeus kasvoi jo selän mittaa suuremmaksi, kun suhde alkuperäisessä tilanteessa oli 0,92. Menettelyllä saatiin virrantiheys laskettua kuitenkin arvoon 3,22 A/m², jolloin staattorin resistiiviset häviöt laskivat noin 10 %. Sähkömagneettiseksi hyötysuhteeksi saatiin tälle moottorille 0,986. Lämpöverkon tulokset on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Lämpenemät levysydämen alueella kasvatetulla staattorin uran korkeudella.

	$\Delta T / ^\circ C$
Lämpenemä levysydämessä	43,5
Lämpenemä uran pohjalla	60,7
Lämpenemä hampaan keskellä	87,1
Lämpenemä ylemmässä vyyhdessä	89,6
Lämpenemä ilmapuoleisessa vyyhdessä	107,5

Kuten taulukon tuloksista havaitaan on ilmapuoleisen vyyhden lämpenemä vieläkin liian suuri. Staattorin resistiivisten häviöiden pienentäminen kuparin dimensioita kasvattamalla ei enää onnistu uran ollessa jo nyt selän korkeutta suurempi. Lisäksi sähkömagneettinen hyötysuhde on jo kohtalaisen hyvä, joten sen huomattava parantaminen on jo vaikeaa. Tulosten perusteella havaitaan, että valittuun nimellispisteeseen ei päästä käytettäessä jäähdytysratkaisuna suoraa merivesijäähdytystä.

7.3 Laajennettu lämpöverkko

Vyyhdenpääalueella lämpenemät ovat voimakkaampia verrattuna muihin alueisiin. Tämän johdosta lämpöverkkoa laajennettiin liitteen 4 mukaisesti siten, että myös vyyhdenpää tulevat huomioiduksi. Samalla haluttiin tarkentaa tuloksia myös levysydämen alueella, koska tiedettiin että lämpötilaerosta johtuen vyyhdenpäiden lämpenemä johtuu osittain levysydäntä kohti, jolloin sydämen päätyalueet lämpenevät keskialueita voimakkaammin. Tämä toteutettiin jakamalla levysydän yhden urajaon alueella symmetrian perusteella aksiaalisesti keskilinjaa pitkin kahteen osaan. Näin syntynyt levysydämen puolikas jaettiin edelleen aksiaalisesti kahtia 2/3-osan kohdalta siten, että ohuempi sektori sijoittui päätyosan puolelle. Näille sektoreille muodostettiin molemmille omat liitteen 1 mukaiset radiaaliset lämpöverkot, jotka yhdistettiin aksiaalisilla lämpöresistansseilla toisiinsa. Lisäksi 1/3-osa sektorin radiaalinen lämpöverkko yhdistettiin vielä levysydämen päätyjen vastaaviin solmuihin hampaiden, selän ja ilmapuoleisen vyyhden solmupisteistä (9)&(11),(7) ja (12). Vyyhdenpääalue yhdistettiin kokonaisuudessaan ilmapuoleiseen vyyhteeseen (solmupisteeseen 16), koska tällä menettelyllä saadaan pahin tilanne aikaiseksi, jolloin mitoituksessa pysytään varmasti turvallisella puolella. Lämpöä siirtyy vyyhdenpäistä myös eristekerroksen yli johtumisen ja konvektion kautta päätyilmaan (solmupiste 18), johon yhdistettiin konvektiovastuksilla myös levysydämen pääty hampaiden ja selän solmupisteistä (14)&(15), (13). Edelleen lämpö siirtyy ilmatilasta konvektion avulla podin sisäpintaan, tästä johtumalla ulkopintaan ja konvektiolla meriveteen, mikä on liitteen 4 laajennetussa lämpöverkossa mallinnettu sarjavastuksella. Kaikkiaan muodostui 18 solmupisteen lämpöverkko, joka ratkaistiin solmumenetelmällä aivan vastaavalla tavalla kuten yllä esitetyn radiaalisen lämpöverkon yhteydessä. Vyyhdenpääalueen häviöt sijoitettiin solmupisteeseen (17) ja levysydämen alueella häviöt kohdistettiin kuten liitteessä 1, mutta jaettiin sektorien suuruksien suhteessa.

Laajennetun lämpöverkon aksiaaliset ja vyyhdenpääalueen resistanssit on määriteltävä liitteessä 3.

7.4 Tulokset laajennetulla lämpöverkolla

Kappaleessa 7.2 esitettyjen tulosten perusteella ei haluttuun nimellispisteeseen päästä käytettäessä jäähdytysratkaisuna suoraa merivesijäähdytystä. Seuraavaksi haluttiin etsiä tarkennetulla lämpöverkolla se teholuokka, joka saataisiin pysymään asetettujen lämpenemärajojen sisällä. Tehokerroin pidettiin edelleen samana mutta moottorin akselitehoa laskettiin vähentämällä roottorin magnetointia. Laskelmien perusteella oli akseliteho pudotettava 15 MW:iin, jotta lämpenemät saadaan hyväksyttävälle tasolle. Seuraavassa taulukossa on esitetty sähkömagneettiset ominaisuudet tälle koneelle.

Taulukko 17. 15 MW:sen tahtimoottorin sähkömagneettiset ominaisuudet.

	Pystymagnetointi, $p = 14$, $q_1 = 2,5$
$\cos \varphi$	0,950 ind.
Akseliteho / kW	15017
Napakulma / °	37,0
Magneettien tilavuus / m ³	0,7020
x_d (pu)	0,671
x_q (pu)	0,631
x_l (pu)	0,207
Staattorivirta / A	3050
T_{\max} / T_N	1,80
Ilmavälivuontiheys / T	0,948
Virrantiheys St. / A/mm ²	2,41
Hyötysuhde	0,988
Kokonaishäviöt / kW	187,0

Vyyhdenpäiden jäähtymiseen vaikuttaa voimakkaasti podin konvektiopinta-ala vyyhdenpääalueella. Tämän pinnan aksiaaliseksi pituudeksi annettiin arvo 450 mm. Kasvatettaessa sitä konvektiiviset lämpöresistanssit pienenevät, mikä johtaa vyyhdenpääalueiden lämpenemien laskemiseen. Lämpöverkon tulokset on esitetty taulukossa 18 solmupisteittäin vastaten lämpöverkkoa liitteessä 4.

Taulukko 18. Puristussovitetun 15 MW tahtimoottorin lämpenemät / °C.

$\Delta T(18)$	70,3	$\Delta T(13)$	69,6	$\Delta T(7)$	30,3	$\Delta T(1)$	29,2
				$\Delta T(8)$	41,9	$\Delta T(2)$	40,3
$\Delta T(18)$	70,3	$\Delta T(14)$	70,1	$\Delta T(11)$	59,9	$\Delta T(5)$	57,6
				$\Delta T(10)$	61,1	$\Delta T(4)$	58,9
$\Delta T(18)$	70,3	$\Delta T(15)$	70,1	$\Delta T(9)$	59,9	$\Delta T(3)$	57,6
$\Delta T(17)$	87,4	$\Delta T(16)$	82,6	$\Delta T(12)$	73,5	$\Delta T(6)$	69,7

Taulukosta havaitaan, että ilmapuoleisessa vyyhdessä lämpenemäero aksiaalisesti moottorin keskipisteen ja vyyhdenpäiden välillä on lähes 20 Celsiusta, mikä vastaa aikaisempien kokemusten ja mittausten perusteella hyvin todellisuutta. Täten lämpöverkkoa voidaan pitää onnistuneena. Tuloksista voidaan havaita myös vyyhdenpäiden levysydämen päätyä lämmittävä vaikutus, lämpenemien ollessa kauttaaltaan keskiosia korkeampia. Käytettäessä ympäristön lämpötilalle arvoa 32 Celsiusta nousee lämpötila vyyhdenpäässä olevassa solmupisteessä noin 120 Celsiukseen. Koska vyyhdenpäiden häviöt yhdistettiin levysydämeen vain ilmapuoleiseen vyyhteen, on todellisuudessa lämpötila hieman alhaisempi häviöiden jakautuessa molemmille vyyhtikerroksille. Tulosten perusteella pysytään nyt tällä mitoituksella lämpenemissä eristysluokan B määäämien rajojen sisällä.

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli mitoittaa suuritehoinen (20 MW) kestopagneetti ruoripotkurimoottori sähkömagneettisesti ja termisesti.

Sähkömagneettisessa mitoituksessa tarkasteltiin kolmea eri roottorigeometriaa käsittäen kestopagneettien pinta-, pysty- ja v-asennuksen. Jokaiselle geometrialle etsittiin tyypilliset ominaisuudet ja samalla optimoitiin suunnitteluparametrejä, jotka käsittivät napaluvun, staattorin käämityksen sekä kestopagneettien dimensiot ja materiaalit. Mitoituksessa päädyttiin napapariluvun $p = 14$ pystymagneetoituun tahtimoottoriin murtovakokäämityksellä, jolla saavutettiin parhaat ominaisuudet ja asetetut vaatimukset täyttyivät. Vertailun lähtökohtana oletettiin jäähdytysratkaisun perustuvan pakotettuun ilmankiertoon, jolla syntyvät tehohäviöt vaaditulla sähkömagneettisella hyötysuhteella saadaan tehokkaasti siirrettyä pois yksiköstä ilman, että jäähdytyslaitteistoa on tarpeen mitoittaa kohtuuttoman suureksi.

Toisena vaihtoehtona yksikön jäähdytysratkaisulle tutkittiin tarkemmin suoraa merivesijäähdytystä, joka lämmönsiirtokyvyn osalta ei ole yhtä tehokas verrattuna pakotettuun ilmankiertoon. Ratkaisulla saavutetaan kuitenkin muita huomattavia etuja muun muassa rakenteen yksinkertaistumisen ja hydrodynaamisen hyötysuhteen parantumisen johdosta, puristusliitettäessä staattorin selkä suoraan podin runkoon kiinni. Termisessä mitoituksessa laadittiin kyseiselle puristussovitetulle ruoripotkuriyksikölle lämpöverkko ja etsittiin se tahtimoottorin teholuokka, joka saadaan pysymään sallituissa lämpenemissä. Laskelmien perusteella oli akselitehoa laskettava noin 25 %.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

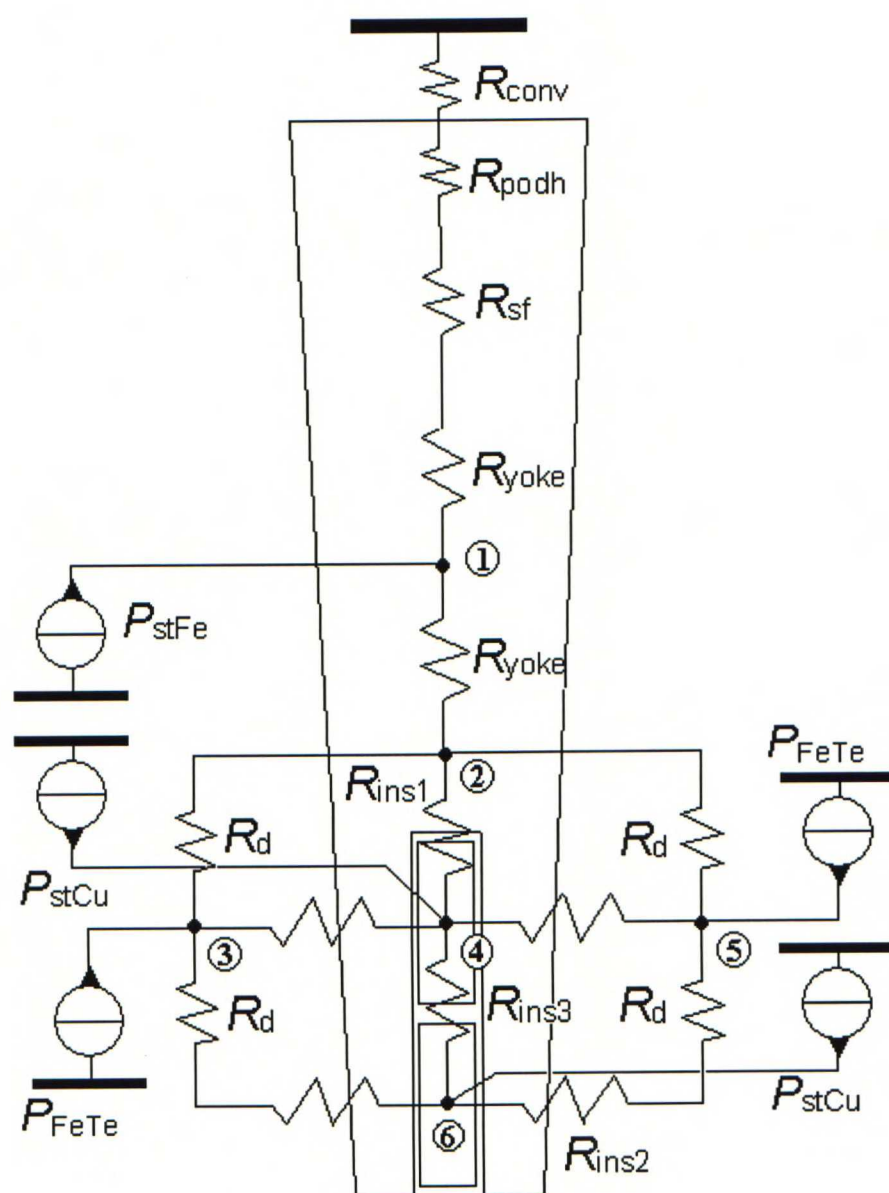
Laskentatulosten perusteella on mielestäni suuritehoisille yksiköille roottorin magnetointi järkevää toteuttaa käyttämällä sylinterin sisään upotettuja magneetteja vaikkakin tämä kostaustuu lievänä magnetointitarpeen kasvuna verrattuna pinta-asennukseen. Magneetit ovat kuitenkin erittäin paljon paremmin suojattuina demagnetoivilta voimilta sekä rautahäviöiltä ja näin ollen niiden magneettiset ominaisuudet säilyvät luotettavimmin läpi koko moottorin elinkaaren. Tämä jo senkin takia, että suuritehoisista kestopagnetoiduista yksiköistä saatu pitkän aikavälin kokemus vielä tällä hetkellä puuttuu ja mahdollisimman luotettavan rakenteen valmistaminen vaikkakin hieman suuremmilla kustannuksilla on mielestäni suunta johon suunnittelussa pitää tässä tilanteessa pyrkiä.

Puristussovitetun ruoripotkuriyksikön termisen mitoituksen osalta tulee lämpöverkon antamiin tuloksiin suhtautua tietyin osin varauksellisesti. Näin suuria yksikköjä puristusliitoksella ei ole valmistettu ja täten mittaustuloksia ei ole olemassa eikä täten myöskään vertailupohjaa laskentatuloksille. Aikaisemman pienemmistä teholuokista saadun kokemuksen perusteella on kuitenkin tiedossa, että lämpenemät vyyhdenpääalueella ovat likimäärin 20 astetta suurempia verrattuna levysydämen keskialueisiin ja tämä tieto tukee mallinnetun lämpöverkon oikeellisuutta. Tulevaisuuden tavoitteena voidaan lämpöverkon osalta pitää sen laajentamista käsittämään myös roottori ja sen kestopagneetit. Tämä johtaa kuitenkin solmupisteiden lukumäärän kasvamiseen, jolloin työssä käytetty matriisin käsin muodostaminen ei ole enää mielekäästä vaan on siirryttävä joko piirisimulointiohjelmien hyödyntämiseen tai vaihtoehtoisesti ohjelmoitava oma lämpöverkko-ohjelma. Työssä syntynyttä 18 solmun lämpöverkkoa voidaan pitää tässä suhteessa raja-arvona.

Kaiken kaikkiaan työssä asetetut tavoitteet saavutettiin mielestäni erinomaisesti. Mitoituksessa löydettiin sekä sähkömagneettiset että termiset vaatimukset täyttävä toteutuskelpoinen ratkaisu niin pakotetulle ilmankierrolle kuin suoralle merivesijäähdytyksellekin. Lisäksi laaditun vertailun ja optimoinnin pohjalta voidaan tulevaisuudessa suuritehoisten yksiköiden tuotekehitys kohdistaa potentiaalisimpiin rakenteisiin ja ominaisuuksiin.

10 LÄHTEET

- ABB Automation, 1999. *Azimuthing Electric Propulsion Drive*. Myyntiesite. 4 s.
- Alasuvanto, T., 1990. *Kestomagnetoidun tahtikoneen suunnittelu elementtimenetelmän avulla*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. 63 s.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., 1996. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4th ed. New York. John Wiley & Sons. 886 s.
- Jokinen, T., 1999. *Tuotekehitys*. Opintomoniste. Teknillinen korkeakoulu. 40 s.
- Luomi, J., 1994. *Sähkömekaniikan numeeriset menetelmät*. Opintomoniste. Teknillinen korkeakoulu. 164 s.
- Nahkuri, V., 1998. *Suuritehoiset kestopagnetoidut laivan potkurimoottorit*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. 58 s.
- Niemenmaa, A., 1989. *Rautahäviöiden synty epätahtikoneessa*. Lisensiaatintyö. Teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Sähkömekaniikan laboratorio. Raportti No. 24. Espoo. 58 s.
- Paloniemi, P., Keskinen, E., 1996. *Sähkökoneiden eristykset*. Opintomoniste. Teknillinen korkeakoulu. 63 s.
- Rosu, M., 1998. *Permanent magnet synchronous motor for ship propulsion drive*. Proc. of International Conference on Electric Ship "ElecShip '98", pp. 81-85. 1st September 1998. Istanbul. Turkey.
- Saari, J., 1995. *Thermal Modelling of high-Speed Induction Machines*. Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series No. 82. 82 s.
- Uotila, H., 1996. *Laivan sähköisen potkurimoottorin jäähdytys*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. 54 s.
- Wagner, W., 1994. *Lämmönsiirto*. Suom. Ranta, O. Helsinki. Painatuskeskus Oy. 210 s.



$$R_{\text{ins1}} = \frac{B_2 * 1000}{\lambda_3 B_{12} L}$$

$$R_{\text{ins2}} = \frac{B_2 * 2 * 1000}{\lambda_3 H_{13} L}$$

$$R_{\text{ins3}} = \frac{(2B_2 + H_2) * 1000}{\lambda_3 B_{12} L}$$

$$R_d = \frac{H_{13} * 1000}{\lambda_2 L Z_{\text{ave}}}$$

$$R_{\text{yoke}} = \frac{\left(\frac{D_{11} - D_{12}}{2} \right) - H_{13}}{\lambda_2 * A_2 * 1000}$$

$$R_{\text{sf}} = \frac{x}{\lambda_x A_3 * 1000}$$

$$R_{\text{podh}} = \frac{s}{\lambda_1 A_3 * 1000}$$

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{\alpha_1 A_4}$$

$$P_{\text{stFe}} = \frac{P_{\text{FeYo}} * 1000}{Q_1}$$

$$P_{\text{stCu}} = \frac{(P_{\text{hL1}} + P_r) * 1000}{2Q_1}$$

$$P_{\text{FeTe}} = \frac{P_{\text{FeTh}} * 1000}{2Q_1}$$

R_{CoSe}	Konvektiivinen lämpöresistanssi podin pinnasta mereen vyyhdenpääalueella
R_{PoCo}	Lämpöresistanssi podin vaipan yli vyyhdenpääalueella
R_{CoPo}	Konvektiivinen lämpöresistanssi päädyn ilmatilasta podin sisäpintaan
R_{CoAi}	Konvektiivinen lämpöresistanssi vyyhdenpääpinnalta päädyn ilmatilaan
R_{InCo}	Lämpöresistanssi vyyhdenpään eristekerroksen yli
R_{1617}	Aksiaalinen lämpöresistanssi vyyhdenpäästä ilmapuoleiseen vyyhteen
R_{1318}	Konvektiivinen lämpöresistanssi levysydämen päädyn selän solmupisteestä päädyn ilmatilaan
$R_{1418} \& R_{1518}$	Konvektiiviset lämpöresistanssit levysydämen päädyn hampaiden solmupisteistä päädyn ilmatilaan
R_{713}	Selän lämpöresistanssi levysydämen päädyistä ohuempaan radiaaliseen verkkoon
$R_{1114} \& R_{915}$	Hampaiden lämpöresistanssit levysydämen päädyistä ohuempaan radiaaliseen verkkoon
R_{1216}	Ilmapuoleisen vyyhden lämpöresistanssi levysydämen päädyistä ohuempaan radiaaliseen verkkoon
R_{17}	Aksiaalinen radiaalisia verkkoja yhdistävä selän lämpöresistanssi
$R_{511} \& R_{39}$	Aksiaaliset radiaalisia verkkoja yhdistävät hampaiden lämpöresistanssit
$R_{410} \& R_{612}$	Aksiaaliset radiaalisia verkkoja yhdistävät vyyhtien lämpöresistanssit

Liite 4 Laajennettu lämpöverkko yhden urajaon alueelta

